

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

22 декабря —

ДЕНЬ ЭНЕРГЕТИКА



1967

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»

12

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

12
1967
ДЕКАБРЬ

ОРГАН АКАДЕМИИ НАУК СССР, ГОСУДАРСТВЕННОГО КОМИТЕТА
СОВЕТА МИНИСТРОВ СССР ПО НАУКЕ И ТЕХНИКЕ, ЦП НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

С праздником, товарищи энергетики!
Желаем вам новых творческих успехов в развитии передовой советской науки и техники, в повышении их роли в строительстве коммунизма!

УДК 378

Советская высшая электротехническая школа

Министр высшего и среднего специального образования СССР

В. П. ЕЛЮТИН

Гениальная формула В. И. Ленина «Коммунизм — это есть советская власть плюс электрификация всей страны» определяет опережающее развитие электротехнической науки и промышленности, а следовательно, и электротехнической школы, которая готовит необходимые кадры и обеспечивает расцвет науки.

В дореволюционной России электротехнической промышленности практически не существовало. Потребности электроэнергетики удовлетворялись иностранными концессиями и импортом электрооборудования. Подготовка инженеров-электриков велась в восьми институтах, выпускавших несколько десятков инженеров в год.

Квалификация профессорско-преподавательского состава была уже в то время относительно высокой, не ниже, чем за рубежом. Однако смелые предложения и открытия ученых оставались, как правило, не реализованными. Они не были нужны отсталому хозяйству.

Принятие плана ГОЭЛРО и его осуществление поставили задачу подготовки специалистов-электротехников. Высшая школа ожила, аудитории заполнились студентами, выходцами из рабочих и крестьян, а лаборатории — новым оборудованием, частично приобретенным за рубежом по личному указанию В. И. Ленина. Началась организация учебного процесса.

В первые годы еще господствовали порядки, традиционные для старой школы: ученье считалось личным делом студента, у каждого института был свой учебный план, каждый профессор придерживался

своей программы, считая ее отличия, часто несущественные, признаком существования своей «школы».

Однако состав студентов стал иным. В вузы пришли люди с фронтов гражданской войны, из рабфаков и позднее — парттысячники. Они не были удовлетворены системой преподавания, их представители вошли во все организации вузов, в том числе и в методические комиссии. Профессорско-преподавательские коллективы вместе со студентами начали поиски лучших решений. Было проверено несколько форм обучения, много найдено ценного, сохранившегося до настоящего времени. Были и отклонения от правильного пути, как например, бригадно-лабораторный метод, при котором группы студентов коллективно выполняли учебные задания и получали зачеты, отмена дипломного проектирования. Были попытки готовить специалистов слишком узкого профиля с сокращенной теоретической базой.

Из-за организационных недостатков учебного процесса количество и качество инженеров, выпускаемых вузами, не удовлетворяло промышленность. Эти недостатки стали особенно очевидными к началу тридцатых годов, когда страна приступила к индустриализации народного хозяйства.

Период 1930—1936 гг. является периодом коренной перестройки высшей школы, в том числе и электротехнической. В июне 1930 г. вышло постановление ВЦИК и СНК СССР «О реорганизации вузов, техникумов и рабфаков», которое предусматривало создание новых институтов, установле-

ние единой номенклатуры специальностей, организацию Комитета по высшему техническому образованию и т. д.; высшая школа получила четкие указания по основам научной организации учебного процесса.

В сентябре 1932 г. ЦИК СССР в постановлении «Об учебных программах и режиме в высшей школе и техникумах» дал указания по ведению занятий: лекций, лабораторных работ, учебному проектированию (восстанавливалось дипломное проектирование), производственному обучению на промышленных предприятиях. Устанавливалась семестровая система экзаменов, которые признавались единственной формой оценки знаний студентов.

В постановлении регламентировалась организационная структура вузов: деление на факультеты, кафедры, которым была отведена роль основных звеньев учебной, методической и научно-исследовательской работы вуза.

В 1936 г. СНК СССР и ЦК ВКП(б) приняли постановление «О работе высших учебных заведений и о руководстве высшей школой», которое определило основные направления в подготовке специалистов, утвердило виды квалификаций, установило соотношения между видами учебных занятий, единые учебные планы и программы.

В этот период также были приняты решения, способствующие повышению квалификации профессорско-преподавательского состава: установлен порядок присвоения ученых степеней и званий, организована подготовка молодых ученых через аспирантуру, упорядочена защита диссертаций. Важное значение имел переход на штатную систему оплаты и ограничение работы преподавателей высшей школы по совместительству.

Подчеркнем некоторые особенности организации учебного процесса, установленные в то время, и впоследствии получившие дальнейшее развитие.

Было определено, что вузы готовят специалистов широкого профиля с глубокой общетеоретической базой. К вопросу о характере профиля институты позднее возвращались неоднократно, причем дискуссии неизменно подтверждали правильность выбора широкого профиля, обеспечивающего дальнейший рост квалификации специалиста на производстве. Хотя в последующее время учебные планы и число специальностей несколько изменилось, принципиальное направление на их единство при рациональном минимуме специальностей сохранилось.

Совершенно необычной для старой школы является принятая в советских вузах система политического, морального и трудового воспитания студентов, имеющая целью подготовить специалистов, преданных идеалам Коммунистической партии, способных вести за собою массы, быть командирами производства.

Деятельность вузов, как и всех других организаций страны, подчинена плановому началу, предусматривающему подготовку необходимого количества специалистов по отдельным специальностям. Каждый из выпускников еще в институте получает направление на конкретную работу в ту или иную отрасль народного хозяйства.

Производство предъявляет все более высокие требования к качеству подготовки специалистов, к уровню их квалификации. С каждым годом студенты должны усваивать все больший объем информации без увеличения срока обучения. Выполнение этих задач требует от вузов постоянной систематической методической работы.

Появилась потребность в специалистах нового типа, больше связанных с наукой. В некоторых областях университетская подготовка стала переплетаться с инженерной. В вузах появились такие специальности как «Инженерная теплофизика», «Инженерная электрофизика», «Радиофизика и электроника» и др. Оказалось необходимым ряд наиболее оснащенных вузов, имеющих квалифицированные кадры и большой опыт, специализировать по подготовке специалистов высшей квалификации, способных быстро ориентироваться в новых научных и инженерных проблемах. Министерство высшего и среднего специального образования СССР представило этим вузам право на составление индивидуальных учебных планов, отражающих специфические особенности в подготовке кадров.

Стиль их работы отражает различные точки зрения на подготовку специалистов и дает богатый материал для выработки наиболее рациональных методов. Так например, для Московского высшего технического училища им. Н. Э. Баумана характерно совершенствование традиционных методов обучения, для Московского энергетического института — развитие самостоятельных занятий и на этой базе — навыков творческой работы, для Ленинградского политехнического института — подготовка специалистов различных профилей на общей широкой теоретической базе и т. п.

Опыт работы перечисленных институтов обобщается на периодических методических конференциях и затем распространяется на другие вузы страны. Одновременно обновляются программы дисциплин, учебные планы специальностей.

Возникает потребность введения новых дисциплин, что невозможно без сокращения уже имеющихся. Чтобы дать место новому, уже известное должно быть уплотнено, сведения концентрированы, некоторые курсы слиты в один, обобщающий. Изменившееся содержание курсов должно быть согласовано так, чтобы обеспечить логичность в последовательности усвоения знаний и избежать повторений.

Процесс этот далеко не простой. В некоторых электротехнических вузах (например в МЭИ) им занимаются ряд постоянно действующих методических комиссий: по математическому, механическому, технологическому, общелектротехническому и другим циклам; по экономическому образованию студентов, по охране труда и т. п. В комиссиях прослеживается отражение сведений, характерных для данного цикла, в программах смежных или взаимно связанных дисциплин за весь срок обучения в вузе.

В результате дискуссий и всестороннего обсуждения объем дисциплин механического цикла в электротехнических вузах резко сокращен. Вместо 15—17 наименований механических дисциплин, предусматриваемых планом 1917 г., в 1967 г. имеется

1—2 таких курса очень небольшого объема. Аналогичную деформацию претерпели дисциплины технологического цикла.

Выше было отмечено, что от многопрофильности и многоплановости высшая школа перешла к унификации. Одним из объектов унификации были учебные планы первых двух курсов. Появилось стремление сделать их идентичными для возможно большего числа специальностей. Однако практика показала, что даже электротехнические специальности, как будто бы более или менее однородные, требуют индивидуального подхода. Так например, всем инженерам необходимо глубокое знание математики. Но радиотехникам нужны более подробные сведения по одним разделам, а энергетикам — по другим.

Специализация требований к общим курсам и ограниченность времени в некоторых случаях приводит к следующим решениям: объем общего классического курса сокращается, а освободившиеся часы используются на развитие специализированного курса, наиболее необходимого специалисту данного профиля. Такое построение общих курсов — математики, физики, механики и др. позволяет более эффективно использовать их материал для задач специальной подготовки. Указанная методика построения курсов нашла, например, широкое развитие в учебных планах Московского энергетического института.

Процесс совершенствования учебных планов и программ непрерывен. Применение кибернетических методов обучения, вероятно, заставит снова внести в них значительные изменения. Однако промежуток времени между пересмотром учебных планов может быть увеличен, если составить их правильно, с учетом перспективы.

Исключительно важным условием ведения учебного процесса является наличие учебников и учебных пособий. В области электротехники почти все курсы обеспечены учебными пособиями, большая часть которых выдержала несколько изданий. Однако в основном это учебные пособия, а не учебники. Они писались как монографии в расчете не только на студентов, но и на инженеров-производственников. Теперь поставлена задача создания учебников, относительно небольших по объему, содержащих самые основные и важные вопросы.

Высшая школа постоянно работает над совершенствованием методики преподавания. Здесь интересно отметить тот бесспорный факт, что сейчас рациональное планирование самостоятельной работы студентов стало уже неотъемлемой частью учебного процесса такой же безусловной, как, скажем, расписание занятий. Многие вузы издают подробные планы учебных занятий и графики обязательных заданий, которые выдаются студентам перед началом семестра и, таким образом, помогают им правильно организовать свой труд.

В последние годы интенсивно разрабатываются методы контроля систематической работы студентов, принятые в МЭИ, МАИ, ЛПИ, ЛЭТИ, а также в Уральском, Киевском политехнических институтах и др. Одним из направлений методической деятельности является обучение студентов приемам самостоятельной работы систематическая помощь

им в этом деле. В первую очередь, приводится в соответствие объем заданий с располагаемым студентами временем, затем им рекомендуется определенная последовательность в работе. По наиболее важным и сложным видам занятий составляются методические пособия, содержащие советы, указания и материалы.

Студенты обучаются приемам не только самостоятельной, но и творческой, исследовательской работы.

Чаще всего этот новый вид занятий называют «Учебные исследовательские работы», но есть и другие формы, в которых эта сторона деятельности студентов получает свое развитие. Студенческие кружки при кафедрах, научно-технические общества, конструкторские бюро, конкурсы на лучшие научно-исследовательские работы — целая система мероприятий, имеющая целью еще в стенах вуза привлечь студентов к научному поиску, к исследованию.

Все это подготавливает студента к полноценному завершению вузовской подготовки в виде самостоятельной разработки дипломного проекта.

Сейчас уже не редкость дипломные проекты, представляющие собой завершение большой работы, начатой еще в исследовательской лаборатории или в конструкторском бюро задолго до начала срока дипломного проектирования.

Поэтому широкое развитие получило реальное проектирование, когда дипломные (а нередко и курсовые) проекты студентов сразу же используются на производстве. Это позволяет молодым инженерам быстрее входить в деловую жизнь.

Важнейшая цель советской высшей школы — осуществление организационной связи между процессами обучения и воспитания. Советское студенчество воспитывается в духе высокой коммунистической идейности и морали с тем, чтобы каждый специалист сочетал в себе лучшие черты строителя и гражданина коммунистического общества, организатора, руководителя и воспитателя масс. Этому подчинен весь учебный процесс, т. е. эти качества будущих специалистов вырабатываются в процессе преподавания всех дисциплин. Но особое место в формировании коммунистического мировоззрения, в идейно-политической закалке студентов занимают общественные науки, внимание к совершенствованию преподавания которых систематически повышается. В этом отношении исключительно важное значение имеет недавно принятое постановление ЦК КПСС о мерах по дальнейшему развитию общественных наук и повышению их роли в коммунистическом строительстве.

Необходимо обеспечить также очень высокий уровень профессорско-преподавательских кадров в научно-педагогическом, политическом и моральном отношениях. Основное пополнение кадров осуществляется через аспирантуру, где, кроме научной подготовки, будущий доцент получает и педагогические знания и практику. В ряде вузов аспиранты обучаются приемам лекторского мастерства, методике проведения основных видов учебных занятий, участвуют в составлении методических пособий

и т. д. Ежегодно проводятся методические конференции, в которых участвует весь персонал данного вуза, периодически организуются межвузовские методические конференции.

За время существования советской высшей школы быстрыми темпами возрастало количество студентов, обучающихся в вузах и число самих вузов. Если в дореволюционный период инженеров электротехнических специальностей выпускали восемь институтов, то в 1967 г. — 151!

Выпуск из этих вузов только за период с 1955 по 1965 г. увеличился по специальностям энергетики с 4,95 до 7 тыс. чел.; по специальностям электромашиностроения и электроприборостроения соответственно с 2,98 до 24,6 тыс. и по специальностям радиотехники и связи с 2,95 до 14 тыс. чел.

Выше была обрисована только одна сторона развития высшей школы — подготовка высококвалифицированных специалистов. Другая сторона развития — научная деятельность — неразрывно связана с первой.

В решении важнейших научных проблем, связанных с электротехническим производством, ведущая роль принадлежит кафедрам крупнейших высших учебных заведений страны.

В этой статье можно только очень кратко коснуться развития некоторых основных направлений электротехнических наук, указать намечающиеся перспективы и назвать ряд имен основоположников данного направления. Следует отметить работы некоторых проблемных и отраслевых лабораторий, организованных в высших учебных заведениях.

Проблемные лаборатории призваны решать комплексные научные проблемы, представляющие большой практический интерес для народного хозяйства. В области электротехники в настоящее время работают девять таких лабораторий (в Москве, Ленинграде, Горьком, Томске и на Урале). Отраслевые лаборатории проводят исследования по темам, имеющим большое значение для народного хозяйства. Таких лабораторий электротехнического профиля организовано двенадцать. Они работают при институтах в городах, перечисленных выше, и кроме того, в Куйбышеве, Львове, Харькове, Новосибирске и в Литве.

Электроэнергетика. Особое значение получили за последние 15—20 лет исследования, связанные с осуществлением Единой Энергосистемы и ее эксплуатации.

За работы в области физического моделирования процессов энергосистем проф. В. А. Веникову и академику М. П. Костенко была присуждена Ленинская премия.

Коллектив проблемной лаборатории электрических систем МЭИ проводит важные исследования, связанные с работой Единой Энергосистемы. Изучаются вопросы кибернетики электрических систем с использованием вычислительных машин для управления режимами сложных автоматизированных электрических систем. С 1962 г. при лаборатории действует модель передачи энергии постоянным током и решаются задачи, связанные с осуществлением передачи дешевой энергии из Сибири в Европейскую часть СССР.

Перспективными задачами научных исследований вузов являются также: освоение электропередач переменного тока 750 кВ и выше, управление энергосистемами и их экономическими режимами с помощью новейших средств комплексной автоматизации и телемеханизации, изыскание путей повышения надежности средств генерирования электроэнергии, ее преобразования, передачи и распределения.

Электромашиностроение. Кардинальные исследования в области теории электрических машин были проведены профессорами К. А. Кругом, К. И. Шенфером, М. П. Костенко. Исследованы вопросы коммутации, пусковые и рабочие режимы асинхронных машин, рабочие и переходные процессы синхронных генераторов. В области трансформаторостроения большую помощь промышленности оказал проф. Г. Н. Петров. Им же предложен высоковольтный генератор, позволяющий обойтись без повысительного трансформатора. Большой вклад в разработку теории и конструирование микромашин внес проф. Ю. С. Чечет.

Ближайшей задачей вузов в области электромашиностроения является совершенствование принципов проектирования электрических машин, создание сверхмощных гидро- и турбогенераторов, участие во внедрении в промышленность единых серий массовых электрических машин и микромашин, совершенствование электроизоляции машин и трансформаторов.

Автоматизация и электрификация промышленности. Начало глубоким теоретическим исследованиям было положено проф. С. А. Ринкевичем, под руководством которого в 1922 г. в Ленинградском электротехническом институте была создана специальность «Электрификация промышленности». Его работу продолжили профессора В. К. Попов, А. Т. Голован, Д. П. Морозов и др., которые в своих трудах осветили все основные вопросы данной области науки.

Кафедрами многих институтов СССР разработаны новые системы автоматизированных электроприводов, производственных механизмов, способствующие повышению производительности и улучшению качества продукции. Например, системы непрерывного и дискретного управления электроприводами на базе электромашиной и полупроводниковой техники.

В частности, можно отметить работы проблемной лаборатории электромеханики МЭИ, где проведены комплексные исследования дискретных систем регулирования с шаговыми двигателями. В результате сотрудничества этой лаборатории с рядом научно-исследовательских институтов и заводов созданы серии шаговых электродвигателей и блоков управления, нашедших широкое применение в различных отраслях промышленности как в нашей стране, так и за рубежом.

Назовем следующие научные проблемы в области автоматизированного электропривода, над которыми должны работать ученые высших учебных заведений: автоматическое управление мощными электроприводами постоянного тока с помощью полупроводниковых преобразователей; управление

асинхронными и синхронными двигателями с системами полупроводниковых преобразователей частоты; исследование и усовершенствование бесконтактных систем непрерывного и дискретного управления электроприводами повышенной надежности; усовершенствование и создание новых систем программного управления и комплексной автоматизации электроприводов с управляющими электронными машинами; широкое внедрение средств вычислительной техники для решения научных задач в области автоматизированного электропривода.

Электрическая тяга. За годы Советской власти наша страна выдвинулась на первое место как по темпам электрификации железных дорог, так и по протяженности электрифицированных линий. К 1975 г. намечается электрифицировать около 45 тыс. км пути или около 25% общей длины железнодорожных линий. В этих достижениях определенная доля заслуг принадлежит и ученым электротехнических вузов.

Еще до тридцатых годов проблемы электрической тяги успешно исследовались в Ленинградском политехническом институте и в МВТУ. Ленинградскими профессорами В. А. Вульфом, А. Б. Лебедевым и В. А. Шевалиным были проведены научные исследования по основам проектирования электрической тяги.

Сейчас в ряде вузов страны ведутся исследования по вопросам электрической тяги, из которых можно отметить следующие: система электрической тяги с асинхронными тяговыми двигателями (ЛИИЖТ); система электрической тяги постоянного тока с импульсным тиристорным регулированием (МЭИ); реостатное торможение электрического подвижного состава переменного тока (МЭИ); применение полупроводников в системе электроснабжения городского транспорта (МЭИ); применение электронных математических машин для исследования режимов работы электрического подвижного состава (МИИТ).

Крупные научные исследования проводятся высшей школой и в таких относительно молодых отраслях электротехники, как электроника, радиотехника, автоматика и вычислительная техника. Одновременное существование в вузах традиционных и новых научных направлений способствует непрерывному обмену идеями между ними, часто весьма плодотворному. Так, например, централизованное управление и контроль, которые впервые появились в энергетике, в дальнейшем стали использоваться в других отраслях промышленности и способствовали созданию новой отрасли науки, так называемой «центротехники». С другой стороны, в энергетике в настоящее время широко применяются последние достижения в области вычислительной техники и создано новое направление, получившее название «кибернетика электрических систем».

Разработкой научных проблем в настоящее время занимаются не только профессора и преподаватели вузов, как это было в первые годы после Ок-

тябрьской революции, но и мощная сеть научно-исследовательских институтов. Однако ни в одном НИИ нельзя найти такого сочетания специалистов разных профилей, какое имеет место в высшей школе. Поэтому научно-исследовательская работа в вузах отнюдь не утратила своего значения, напротив, по мере развития сети высших учебных заведений ее роль непрерывно возрастает. Ученые вузов должны сохранять ведущую роль науки в высшей школе, поддерживая тесную связь с научно-исследовательскими организациями и с производством.

Юбилейный пятидесятый год является знаменательной вехой на пути крутого подъема производительных сил нашей страны, развития науки, промышленности и сельского хозяйства.

Немалая роль в этом деле отводится советской высшей школе — кузнице инженерных и научных кадров. Профессора, преподаватели и научные сотрудники высших учебных заведений приложат все усилия к тому, чтобы своим творческим трудом приблизить светлое коммунистическое будущее.

Для этого высшая школа имеет все возможности. В настоящее время в вузах трудится 264 тыс. научно-педагогических работников, среди которых 267 академиков и членов-корреспондентов академий, более 8 тыс. докторов и около 75 тыс. кандидатов наук. Эту армию ежегодно пополняют около 20 тыс. молодых научно-педагогических работников, оканчивающих вузовскую аспирантуру.

Высшая школа имеет богатые традиции в развитии научных исследований. В ней развиваются пользующиеся мировой известностью научные школы. На протяжении 50-летней истории развития нашего государства высшая школа играла выдающуюся роль в решении многих актуальных научно-технических проблем. Нет ни одного крупного направления в науке и технике, в котором ни принимали бы деятельного участия вузовские ученые. Сейчас советская высшая школа и, в частности техническая, наряду с традиционными прикладными работами все активнее включается в исследования стыковых между естествознанием и техникой научных проблем, широко внедряя методы фундаментальных наук в практику своих исследований.

За текущее пятилетие высшая школа подготовит 2 млн. 700 тыс. новых специалистов, в том числе 1 млн. 100 тыс. инженеров.

Выполняя заветы великого Ленина и указания славной Коммунистической партии, советская высшая школа высоко несет знамя передовой науки, совершенствует свою работу по подготовке высококвалифицированных кадров, стоящих на уровне современных достижений науки и техники, хорошо знающих практику дела, воспитанных в духе великих идей марксизма-ленинизма, способных работать творчески, самостоятельно решать актуальные проблемы дальнейшего научного, технического и культурного прогресса нашей Родины.



Некоторые исследования разрядных напряжений в сжатых газах

Доктор техн. наук, проф. А. М. ЗАЛЕССКИЙ, аспирант К. ЗИБЕР
и канд. техн. наук, доц. А. И. ПОЛТЕВ
Ленинград

За последние полтора десятилетия в практике мирового аппаратостроения наряду с маслом и воздухом широкое распространение получил элегаз. В выключателях элегаз является не только дугогасительной средой, но и изоляционной. В силовых трансформаторах, трансформаторах тока, кабелях, конденсаторах, электростатических генераторах и т. п. сжатые газы применяются в качестве изоляции [Л. 1, 2, 3]. Некоторые зарубежные фирмы выпускают полностью изолированные элегазом распределительные устройства на напряжения до 230 кВ [Л. 4].

В любой из упомянутых конструкций газовая изоляция, как правило, применяется в сочетании с каким-либо твердым изоляционным материалом, который может существенным образом изменить электрическое поле промежутка. Вследствие этого изменяется и его электрическая прочность. На величину разрядного напряжения по поверхности изоляционного материала влияют также поверхностная проводимость, зависящая от влажности газа, и местные скопления зарядов на поверхности, искажающие электрическое поле.

Несмотря на широкое применение газовой изоляции в электротехнических устройствах и, в частности, в электрических аппаратах высокого напряжения, электрическая прочность по поверхности твердых изоляционных материалов в сжатых газах недостаточно изучена. Большая часть известных работ посвящена изучению разрядного напряжения в воздухе и в элегазе в равномерном электрическом поле [Л. 5] и резко неравномерном поле [Л. 6 и 7]. В упомянутых работах отмечается влияние конструкции промежутка с твердым изоляционным материалом на величину разрядного напряжения. Однако эти результаты недостаточны для разработки высоковольтных конструкций. Настоящая работа частично восполняет этот пробел.

Исследования проводились в заземленной стальной камере, показанной на рис. 1, с вводом барьерного типа 2, наполненным элегазом при давлении 6 ата. Размеры камеры были выбраны достаточно большими, чтобы можно было пренебречь влиянием ее стенок на электрическое поле между электродами. Для наблюдения и фотографирования разрядов в стенке камеры имелось специальное окно 3. Для точной установки цилиндрический электрод 4, диаметром 28 мм, находящийся под напряжением, крепился к нижней части ввода посредством карданного устройства. Нижний электрод 5 диаметром 150 мм, представлявший собой поверхность Роговского, крепился к штоку 6, посредством которого при вращении штурвала 7 изменялось расстояние между электродами. При изменении начального напряжения короны электроды менялись местами.

Газы перед подачей в камеру очищались от масла и других газообразных примесей специальными фильтрами. Осушка их производилась силикагелем. Газообразные продукты разложения элегаза, возникающие при разрядах, поглощались активированной окисью алюминия. По окончании очередной

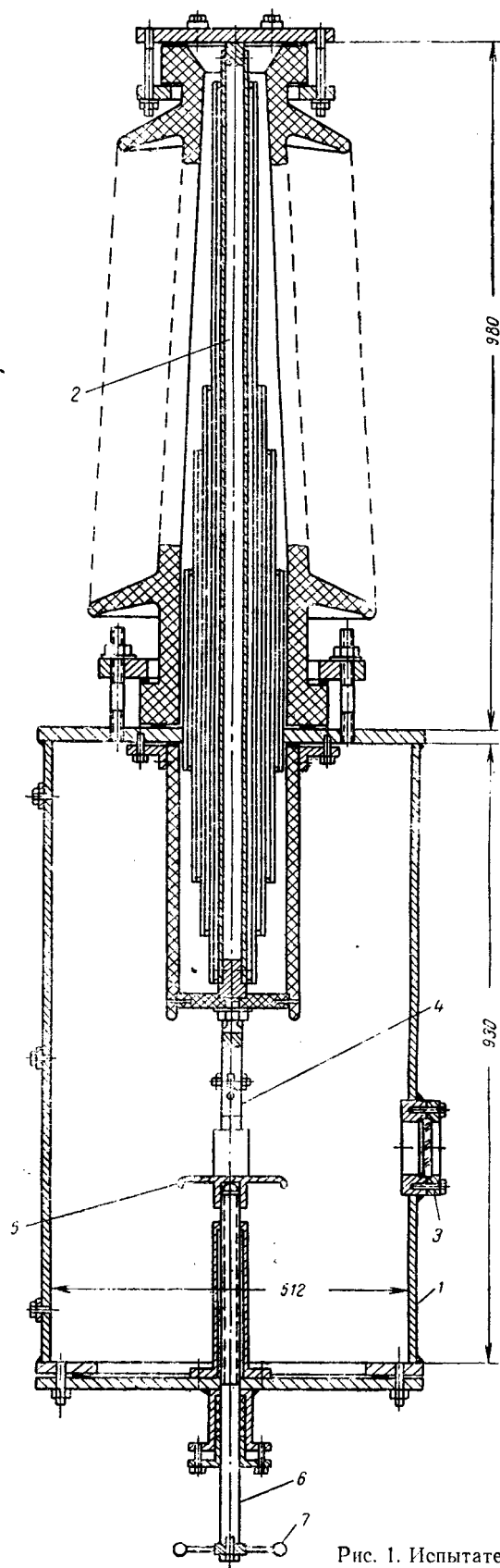


Рис. 1. Испытательная камера.

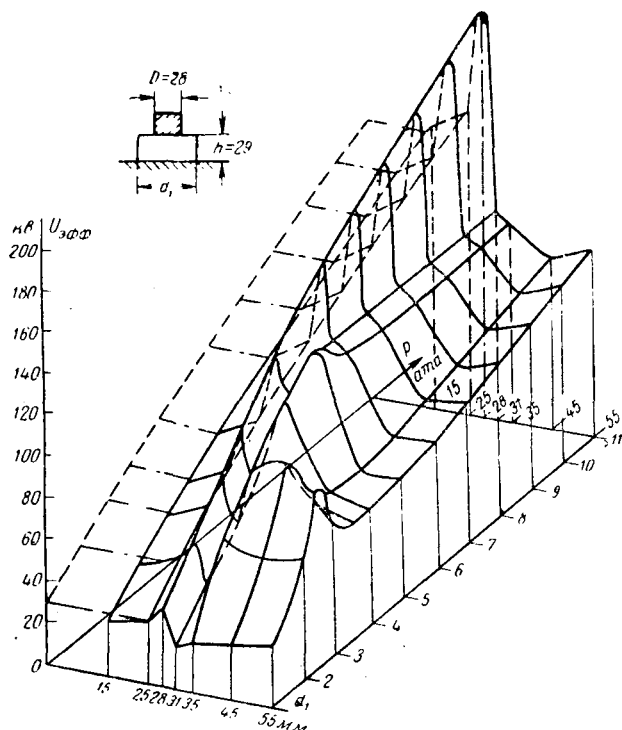


Рис. 2. Зависимость разрядного напряжения от давления воздуха и диаметра образца.

серии опытов элегаз из камеры перекачивался в резервную емкость и после соответствующей очистки использовался вновь. Повторное использование элегаза не искажало результаты исследований. Перед каждым наполнением воздух из камеры откачивался до давления, примерно 1 мм ртутного столба, и камера промывалась элегазом. Опыт после наполнения камеры начинался через промежуток времени, необходимый для установления температурного равновесия. Влажность поступающего в камеру воздуха, контролировавшаяся влагомером, не превышала $0,05 \text{ г/м}^3$, а элегаза — $0,5 \text{ г/м}^3$.

Исследованию подвергались образцы из поперечнослойного гетинакса различного диаметра и высоты. При изготовлении обработку поверхности образцов стремились сохранить одной и той же. Для лучшего соприкосновения электродов с образцами на их контактирующие поверхности наносился тонкий слой графита.

Перед опытом испытуемый образец устанавливался соосно с электродами и зажимался между ними с силой порядка 200—400 кг.

Эксперименты проводились при промышленной частоте со скоростью подъема напряжения примерно 1 кВ/сек. Напряжение измерялось вольтметром, подключенным к измерительной обмотке испытательного трансформатора и градуированным по шаровому разряднику. Разрядное напряжение определялось как среднее арифметическое из 4÷6 отсчетов, причем каждая из экспериментальных зависимостей $U_p = f(p)$ была получена из опытов не менее чем с тремя одинаковыми образцами.

Разброс экспериментальных значений составлял обычно 2—4%, но иногда достигал 6%. Промежу-

ток времени между разрядами составлял не менее 4-х минут: при более частых разрядах из-за сохранившихся поверхностных зарядов наблюдался повышенный разброс разрядного напряжения. Пробивное напряжение $U_{пр}$ промежутка без образца определялось как среднее арифметическое из 10 отсчетов. Разброс такой же, как и в первом случае. Начальное напряжение короны определялось посредством электронного осциллографа, который регистрировал всплески напряжения на катушке, включенной между цилиндрическим электродом и землей.

Известно, что величина разрядного напряжения по поверхности изолятора зависит от его формы [Л. 8]. Поэтому представлялось целесообразным отыскать оптимальную конструкцию, состоящую из электрода и твердого изоляционного материала, предназначенную для работы в сжатых газах.

На рис. 2 представлена зависимость разрядного напряжения от диаметра изоляционного образца и давления воздуха. Эта зависимость представляет собой сложную криволинейную поверхность с двумя хребтами и впадиной между ними. Первый хребет имеет место при диаметре образца d_1 , равном диаметру электрода D , и его высота растет монотонно с повышением давления. Второй хребет — при $d_1 > D$, причем при давлениях, меньших 1 атм и больших 6 атм, он совершенно исчезает. Следует отметить, что в диапазоне давлений 2—4 атм разрядные напряжения, соответствующие второму хребту, превосходят соответствующие значения первого хребта. Таким образом (за исключением области давлений 2—4 атм), наилучшим с точки зрения разрядного напряжения является образец диаметром $d_1 = D$, расположенный с электродом на одной оси.

На рисунке, кроме того, приведены значения пробивного напряжения $U_{пр}$ в случае отсутствия образца ($d_1 = 0$) — левая пунктирная линия.

При давлениях, меньших 2 атм, разряд по поверхности образца происходит в виде слабой дуги, опорная точка которой находится на остром краю цилиндрического электрода. В случае более высоких давлений разряд возникает в виде многочисленных искр, начинающихся там же. При $d_1 > D$ они идут сначала по выступающему торцу образца и затем по воздуху, следуя приблизительно силовым линиям электрического поля. Фотография разряда приведена на рис. 3. В случае, если $d_1 \leq D$ искры распространяются в основном по воздуху, не прикасаясь к поверхности образца.

Во всех случаях, за исключением $d_1 = D$, разряду предшествует яркая корона в виде светящегося



Рис. 3. Фотография разряда ($p=5,5 \text{ атм}$, $d_1=45 \text{ мм}$, $U_{раз}=60 \text{ кВ}$).

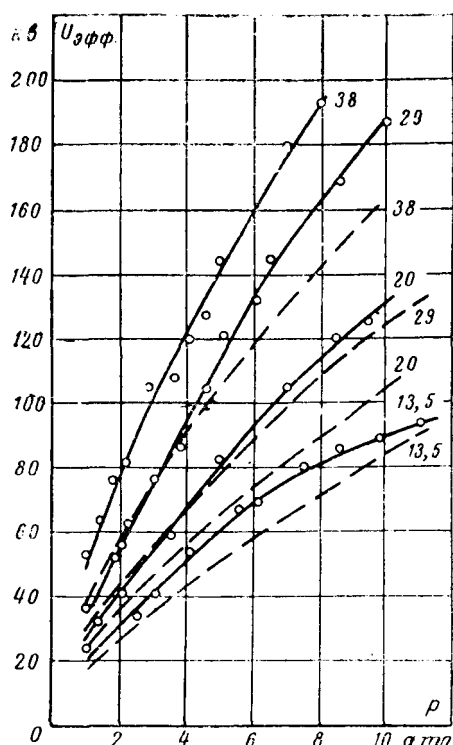


Рис. 4. Кривые разрядных и пробивных напряжений в зависимости от давления для разных высот образца

○ — разрядное напряжение
— — — — — пробивное напряжение
Цифры на кривых означают расстояние между электродами в мм.

кольца на краю электрода, которая с повышением давления постепенно исчезает. При $d_1 = D$ слабо светящаяся корона наблюдается только при давлениях до 3—4 атм. Следует отметить, что при уменьшении высоты она исчезает полностью.

Наличие первого максимума в кривых $U_p = f(d_1)$ можно объяснить следующим образом. Когда испытуемый образец является как бы продолжением электрода, напряженность электрического поля у острого края электрода снижается из-за большей диэлектрической проницаемости образца, что под-

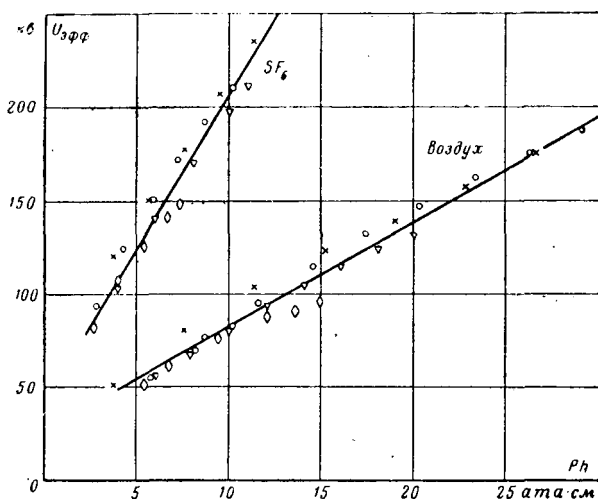


Рис. 5. Зависимости разрядного напряжения от произведения $p \cdot h$ для воздуха и элегаза:

p — давление в атм; h — высота образца в см; \times — $h = 3,8$; \circ — $h = 2,9$; ∇ — $h = 2,0$; \diamond — $h = 1,35$ см.

тверждается ослаблением короны в этом случае. Если же $D > d_1$, то выступающий острый край электрода создает резко неравномерное поле, вследствие чего разрядное напряжение снижается. В случае же, когда d_1 несколько больше D , выступающий край образца создает благоприятные условия для скользящего разряда у электрода, что приводит к снижению разрядного напряжения. Наличие второго хребта является, по-видимому, следствием аномалии, подобной той, которая наблюдается в кривой $U_{пр} = f(p)$ для случая резко неравномерного поля.

Для оптимального варианта ($d_1 = D$) на рис. 4 приведены зависимости разрядного напряжения от давления при различных высотах образцов. На рисунке, кроме того, приведены кривые пробивных напряжений при расстояниях между электродами, равных высоте образцов (пунктир). Эти кривые лежат значительно ниже, чем соответствующие кривые разрядного напряжения.

На величину разрядного напряжения существенное влияние оказывала точность установки образца: малейшие неплотности прилегания поверхностей образца и электродов, незначительная их несоосность или отклонения образца по диаметру вызывали значительный разброс экспериментальных результатов, полученных на разных образцах.

Приведенные на рис. 4 кривые разрядного напряжения можно представить в зависимости от произведения $p \cdot h$ (рис. 5). Несмотря на значительный разброс точек очевидна линейная зависимость, которую можно представить эмпирической формулой

$$U_p = 25 + 5,72ph \text{ [кВ]},$$

где p — давление в атм,
 h — высота образца в см.

Эта формула с наибольшей погрешностью, не превышающей 15%, позволяет вычислить разрядное напряжение в случае, когда $1 < h < 5$ см.

На рис. 6 показано влияние малого зазора между образцом и электродом на величину разрядного напряжения и напряжения начала короны. Уже при наличии зазора в 50 микрон разрядное напряжение значительно снижается, причем снижение тем больше, чем выше давление воздуха. Так например, для давления 8 атм снижение по отношению к разрядному напряжению образца без зазора достигает 40%. При толщине зазора 0,5 мм и том же давлении разрядное напряжение составляет всего лишь 35% от первоначального значения. Зазор создавался прокладками малого диаметра, помещаемыми между электродом и образцом.

Из-за повышенной напряженности электрического поля в зазоре (во всем диапазоне давлений) разряду предшествует корона, появляющаяся при напряжении, равном 30—50% от разрядного. При отсутствии зазора корона не наблюдалась. Как видно из рис. 6, при наличии зазора способ повышения разрядного напряжения и напряжения начала короны увеличением давления является неэффективным.

На рис. 7, а и б приведены результаты исследования разрядного и пробивного напряжений и напряжения начала короны (пунктир) в элегазе для

оптимального варианта ($d_1 = D$). Как видно из рисунков, разрядное напряжение для всех высот изоляционных образцов растет монотонно с повышением давления, в кривых же пробивного напряжения для расстояний 29 и 38 мм наблюдается аномалия, свойственная резко неравномерному полю в электроотрицательных газах.

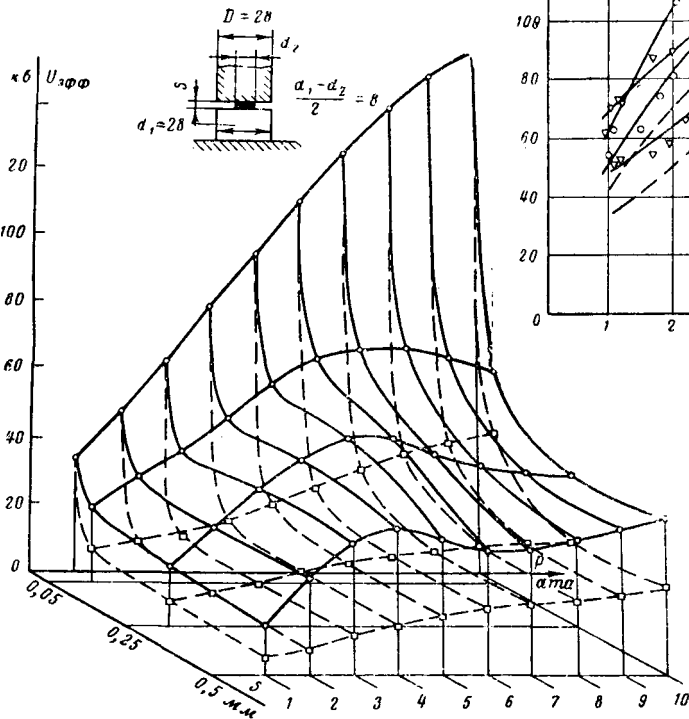


Рис. 6. Зависимость разрядного напряжения и напряжения начала короны от толщины зазора между изоляционным образцом и цилиндрическим электродом и давления.

— разрядное напряжение;
--- напряжение начала короны.

В отличие от воздуха в элегазе при давлениях, меньших 2 ата, пробивное напряжение равно или даже больше разрядного. Во всех случаях пробой промежутка без образца предшествовала корона. При наличии же образца и расстояниях 13,5 и 20 мм корона не наблюдалась. Интересно отметить, что показанные на рис. 7, б кривые начала короны при наличии образца лежат значительно выше таковых при его отсутствии.

Все кривые разрядных напряжений в элегазе приведенные на рисунках 7, а и б, описываются эмпирической формулой

$$U_p = 40 + 16,7ph \text{ [кВ]},$$

полученной на рис. 5. Точность и область применения этой формулы те же самые, что и для воздуха.

Сравнение разрядных напряжений показывает, что в элегазе разряд происходит при напряжениях в 2,2—2,6 более высоких, чем в воздухе, причем более высокие отношения соответствуют меньшим значениям ph .

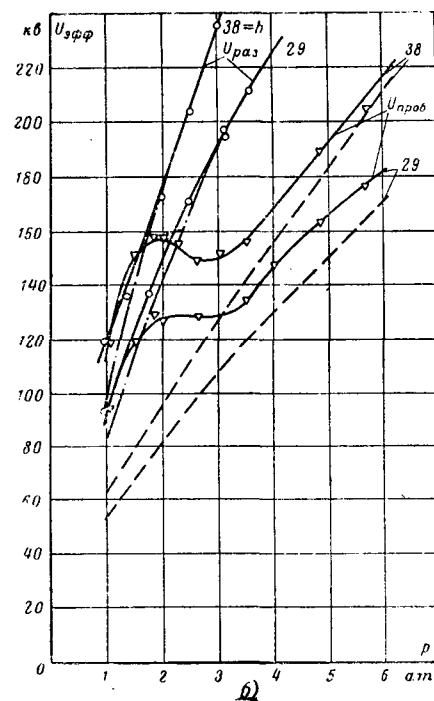
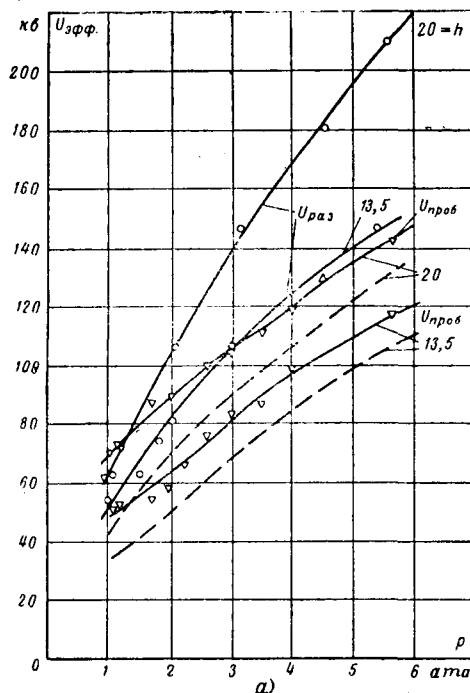


Рис. 7, а, б. Кривые разрядного и пробивного напряжения и напряжения начала короны в зависимости от давления при разных высотах образца.

—○—○— разрядное напряжение;
—△— пробивное напряжение;
--- напряжение начала короны при наличии образца;
— напряжение начала короны при отсутствии образца.

Выводы. 1. Оптимальной изоляционной конструкцией в сжатых газах является такая, в которой твердый изоляционный материал как бы продолжает электрод.

2. При осуществлении подобной конструкции следует избегать зазоров и неплотностей между электродами и изоляционными материалами.

3. Замена воздуха элегазом дает возможность увеличить разрядное напряжение в 2,2—2,6 раза.

4. Приведенные результаты могут быть использованы при разработке конструкций электрических аппаратов и других устройств высокого напряжения, в которых в качестве изоляционной среды применяются сжатые газы.

Литература

- Howard P. R., Compressed Gases as Insulants in High-voltage Equipments, Electr. Times, vol. 132 (1957), № 3442, p. 683.
- Liao T. W., Compressed Gas as a High-voltage Insulant, CEEB—Conference on Gasdischarges and Supply Industry, 1962, p. 321.
- Trump J. G., Compressed Gas Insulants and Electric Power Systems, CEEB—Conference on Gasdischarges and Supply Industry, 1962, p. 348.
- Frowein E. A., Szente-Varga H. P., Gekapselte Hochspannungsanlagen mit SF_6 —Isolation. BBC-Mitt. (1966), Bd 53, № 4/5, s. 340.
- Trump J. G., Andrias, High-Voltage DC-Flashover of Solid Insulators in Compressed Nitrogen, Trans. AIEE, vol. 60 (1941), p. 986.
- Howard, P. R. Insulating Properties of compressed electronegative Gases. Proc. IEE (1957), Pt. A. № 6—14.
- Nitta T., Yamada N., Kawane K., Electrical Breakdown Characteristics of SF_6 . Vol. 139 (1965), № 8.
- Winkelkemper H., Hermstein H., Einfluß der Formgebung stützerartiger Innenraum—Isolieranordnungen auf ihr Überschlagesverhalten, ETZ—A, Bd 78 (1957), A. 16, s. 561.

[4.4.1967]

Некоторые закономерности поверхностного разряда в элегазе (SF_6)

Инж. В. Н. БОРИН

Всесоюзный электротехнический институт им. В. И. Ленина

В настоящее время в отечественном и зарубежном аппаратостроении и трансформаторостроении все более широкое применение находит элегаз, который является хорошей изолирующей и дугогасящей средой. В связи с этим изучение поверхностного разряда в неоднородных полях вдоль твердых диэлектриков, находящихся в атмосфере элегаза, представляет большой практический интерес. Чаше всего именно этот разряд определяет допустимое рабочее напряжение высоковольтного оборудования.

Как известно, неоднородность электрического поля может быть обусловлена как формой электродов, так и формой и расположением диэлектрика, причем наибольшее влияние на величину напряжения перекрытия оказывает форма электродов. В практических конструкциях электроды очень часто имеют острые или закругленные малыми радиусами кромки.

В настоящей работе рассмотрены некоторые закономерности поверхностного разряда в неоднородном поле в элегазе. Исследования проводились, в основном, при воздействии импульсного напряжения ($1,5/40$ мксек). Импульсные напряжения являются определяющими при выборе изоляции высоковольтных устройств с элегазом, так как для этой изоляции характерен небольшой коэффициент импульса ($1,2$ — $1,3$ по данным [Л. 1]).

Подготовка образцов проводилась таким образом, чтобы испытания изоляции проводились в условиях близких к тем, которые имеют место в реальных конструкциях элегазовых трансформаторов и аппаратов. Опыты проводились в металлической камере диаметром 400 мм. Перед заполнением элегазом камера вакуумировалась в течение нескольких часов. Остаточное давление в камере было равно $0,2$ мм рт. ст. Таким образом, твердая изоляция подвергалась вакуумной сушке при комнатной температуре, в результате которой удалялась поверхностная влага.

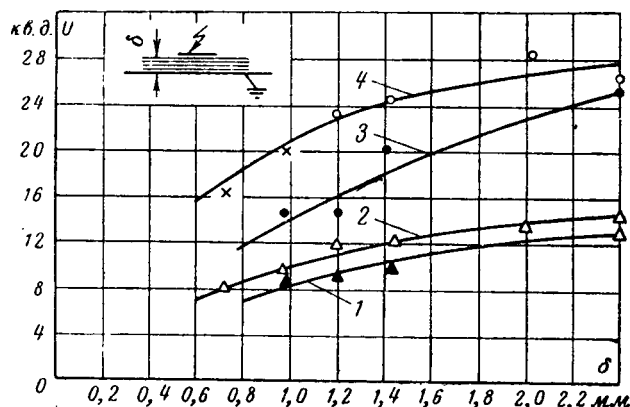


Рис. 1. Напряжение перекрытия (3, 4) и скользящих разрядов (1, 2) (средние значения) в функции толщины диэлектрика. Кабельная бумага. Элегаз 2 атм.

1, 3 — длина уступа по слою изоляции— 5 мм; 2, 4 — то же 30 мм.

Известно, что в случае поверхностного разряда в неоднородном поле электродные устройства могут быть разделены на две группы:

1 — электродные устройства, в которых нормальная к поверхности твердого диэлектрика составляющая электрического поля преобладает над тангенциальной;

2 — вблизи электродов силовые линии пересекают поверхность диэлектрика, но в более удаленных точках преобладает тангенциальная составляющая поля.

Поверхностный разряд в электродном устройстве с преобладающей нормальной составляющей поля в элегазе, как и в воздухе, начинается с коронного разряда, который носит непрерывный, диффузный характер. В воздухе при увеличении напряжения коронный разряд приобретает вид полосы, состоящей из мелких, нитевидных слабо светящихся искр, а затем на поверхности твердого диэлектрика возникают яркие светящиеся искры — скользящие разряды. В элегазе при повышении воздействующего напряжения после начала коронной стадии разряда в $2,0$ — $2,5$ раза наблюдается образование нитевидных ветвящихся разрядных каналов, длины которых растут с увеличением напряжения. Внешний вид этих незавершенных поверхностных разрядов не изменяется вплоть до полного перекрытия между электродами, которое происходит лишь при напряжении в $1,5$ — $2,0$ раза больше напряжения появления этих разрядов.

Соотношение напряжений перекрытия в элегазе и воздухе при давлении 1 атм и прочих равных условиях составляет примерно $1,3$ — $1,4$. Это значительно меньше соотношения электрической прочности элегаза и воздуха в однородном поле, которое равно $2,5$.

Для различных толщин диэлектрика некоторые функциональные зависимости, характеризующие разряд с преобладающей нормальной составляющей поля, изменяются. Например, с увеличением толщины твердого диэлектрика с 1 до $2,5$ мм рост напряжения перекрытия при увеличении расстояния между электродами замедляется и соотношение напряжений перекрытия и начала скользящих разрядов уменьшается (рис. 1).

Объяснение этих закономерностей может быть дано, если рассмотреть изменение поля около электрода, с которого развивается разряд. Для малых толщин изоляции характерна незначительная тангенциальная составляющая поля. Достаточно высокие напряженности имеют место во всех точках края электрода. Поэтому коронный разряд имеет характер ровного диффузного разряда. При дальнейшем повышении напряжения появляется большое число каналов незавершенных разрядов, развитие которых вдоль поверхности затруднено, поскольку мала тангенциальная составляющая поля и имеет место их взаимное экранирование.

При увеличении толщины изоляции ($2,0$ — $2,5$ мм) соотношение нормальной и тангенциальной

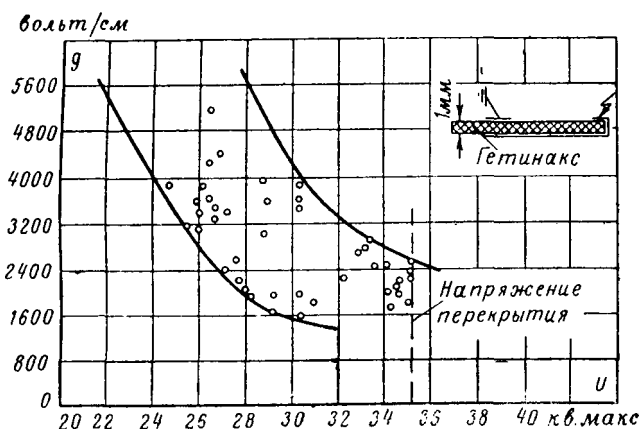


Рис. 2. Градиенты потенциала в канале поверхностного разряда с преобладающей нормальной составляющей электрического поля в функции приложенного напряжения.
Элегаз 1 ата, импульсное напряжение $+1,0/125$ мксек.

составляющих электрического поля, естественно, изменяется в пользу последней. Внешне это выражается в том, что коронный разряд становится менее ровным и диффузным. Число каналов незавершенных скользящих разрядов уменьшается, их развитие вдоль поверхности твердого диэлектрика облегчено большей тангенциальной составляющей поля.

Одним из наиболее важных параметров разряда является градиент потенциала в его канале. Были выполнены измерения средних градиентов в канале незавершенных поверхностных разрядов. Измерения проводились при помощи зонда, вводимого в канал разряда, с емкостным делителем напряжения. Измерялось падение напряжения на участке от электрода, с которого развивается разряд, до зонда. Длина канала разряда до зонда определялась путем фотографирования разряда.

Измерения показали, что средние градиенты потенциала в канале поверхностного разряда в элегазе зависят от величины приложенного напряжения (рис. 2). Так, для образца с твердым диэлектриком из гетинакса толщиной 1 мм и отрицательной полярности электрода с наибольшей напряженностью поля (заземленный электрод) градиенты уменьшаются от 4—5 кВ/см в момент возникновения разрядов до 1,5—2,5 кВ/см непосредственно перед перекрытием. В то же время в воздухе градиенты в канале скользящих разрядов равны 100—200 в/см. Таким образом, скользящие разряды не обладают высокой проводимостью, которая характерна для канала скользящего разряда в воздухе. Относительно причин высоких значений средних градиентов потенциала можно сказать следующее. Для элегаза характерно образование значительных объемных зарядов отрицательных ионов SF_6^- и SF_5^- . Коэффициент диффузии этих тяжелых молекулярных ионов в 4 раза меньше, чем для ионов воздуха. Кажущийся заряд коронного разряда в элегазе в 5—10 раз меньше, чем в воздухе при прочих равных условиях (измерения выполнены с помощью измерителя ионизации ИИ-3). Все это приводит к тому, что формирующийся разрядный канал обладает существенно более высокими градиентами, чем скользящий разряд в воздухе.

Вологодская областная универсальная научная библиотека

www.booksite.ru

Для толщин твердого диэлектрика более 1 мм (2—5 мм) средние градиенты потенциала в канале этих разрядов в момент их возникновения равны 5—7 кВ/см, однако непосредственно перед перекрытием промежутка они уменьшаются до сотен вольт на сантиметр. Видимо, этим объясняется замедление роста напряжения перекрытия при увеличении межэлектродного расстояния для указанных толщин диэлектрика.

Поверхностный разряд в электродном устройстве с преобладающей тангенциальной составляющей электрического поля также имеет две стадии развития. При повышении приложенного напряжения после возникновения на электродах короны образуются нитевидные светящиеся каналы незавершенных поверхностных разрядов. Длина их очень быстро растет при увеличении напряжения, и перекрытие происходит при напряжении, лишь на несколько процентов большем напряжения появления незавершенных поверхностных разрядов. На рис. 3 приведены фотографии незавершенных поверхностных разрядов с острия в воздухе и элегазе. Если в воздухе перед головкой разрядного канала хорошо заметна область предварительной ионизации, состоящая из слабо светящихся нитей, то в элегазе область предварительной ионизации не видна.

Соотношение разрядных напряжений в элегазе и воздухе при прочих равных условиях в этом случае поверхностного разряда существенно зависит от конфигурации электрического поля вблизи электродов. На рис. 4 приведены зависимости импульсного напряжения перекрытия по поверхности бакелитового цилиндра от расстояния между электродами в элегазе и воздухе. Электродами служили полоски медной фольги, которые накладывались на бакелитовый цилиндр. Использовались полоски как с ровными краями, так и с острыми выступами на 10—15 мм от ровного края.

Полученные зависимости показывают, что при наличии острых выступов на электродах значительно снижается напряжение перекрытия в элегазе. С увеличением длины промежутка рост напряжения перекрытия в элегазе по сравнению с воздухом замедляется и при расстояниях между электродами 180—200 мм напряжение перекрытия в элегазе даже при давлении 2 ата лишь на несколько процентов превышает напряжение перекрытия в воздухе при атмосферном давлении. Здесь следует указать, что напряжение пробоя газового промежутка между электродами сфера — плоскость при расстоянии между электро-

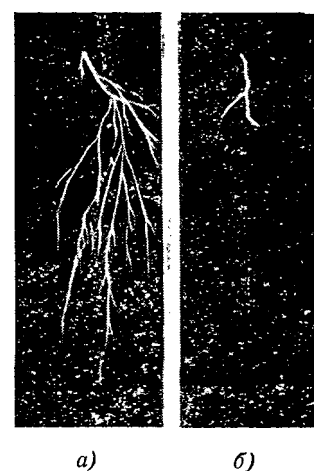


Рис. 3. Фотографии незавершенных поверхностных разрядов по бакелиту. Расстояние между электродами 135 мм. Импульсное напряжение $+1,5/40$ мксек.

а — воздух 1 ата, приложенное напряжение 105,5 кВ_{макс}; б — элегаз 2 ата, приложенное напряжение 114,0 кВ_{макс}.

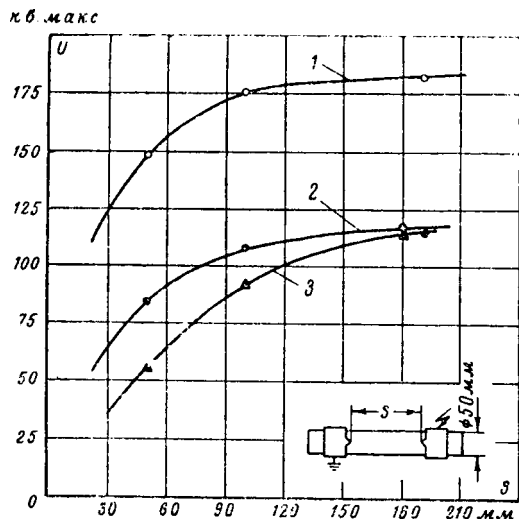


Рис. 4. Напряжение перекрытия (средние значения) по бакелиту в функции расстояния между электродами.

Импульсное напряжение $+1,5/40$ мксек.

1 — элегаз 2 ата, электроды с ровным краем; 2 — элегаз 2 ата, электроды с острием; 3 — воздух 1 ата, электроды с острием.

дами 150—250 мм в элегазе может быть ниже, чем в воздухе при прочих равных условиях [Л. 2].

На рис. 5 приведены зависимости напряжения поверхностного разряда по гетинаксу в функции расстояния между электродами, выполненными в виде двух пластин толщиной 3 мм и с радиусами закругления краев 1,5 мм. Такие зависимости представляют практический интерес, например, при выборе изоляции отводов на крепежной раме элегазовых трансформаторов. С приведенными на рис. 5 данными хорошо согласуются, несмотря на различия в диэлектрике и форме электродов, значения напряжения перекрытия по бакелитовому цилиндру с электродами из фольги толщиной 0,06 мм, имеющими выступающую острую часть.

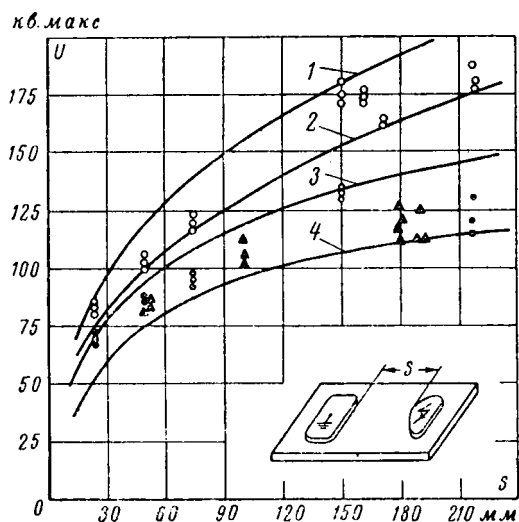


Рис. 5. Напряжение перекрытия по гетинаксу в функции расстояния между электродами «пластина — пластина». Элегаз 2 ата.

1, 2 — огибающие максимальных и минимальных значений, волна напряжения $-1,5/40$ мксек; 3, 4 — огибающие максимальных и минимальных значений, волна напряжения $+1,5/40$ мксек; ▲ — напряжения перекрытия по бакелиту для электродов, имеющих острия.

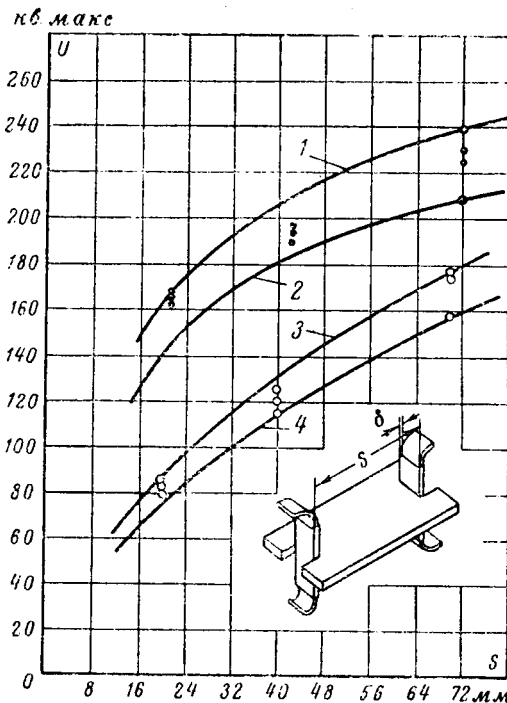


Рис. 6. Напряжение перекрытия по гетинаксу для электродного устройства «провод — провод» в функции расстояния между электродами.

Импульсное напряжение $+1,5/40$ мксек. Элегаз 2 ата.

1, 2 — огибающие максимальных и минимальных значений, $\delta=0,8$ мм; 3, 4 — огибающие максимальных и минимальных значений, $\delta=0$.

В то же время напряжения перекрытия по гетинаксу в электродном устройстве «провод — провод» для неизолированных электродов (рис. 6) значительно превосходят напряжения, полученные для электродного устройства «пластина — пластина». Отметим, что провод имел сечение $2,5 \times 10$ мм² и радиус закругления его кромок был меньше, чем для электродов в виде пластин.

Таким образом, если искать причину низких значений напряжения перекрытия в элегазе только в конфигурации поверхности электродов (например для поверхностного разряда по бакелитовому цилиндру), то трудно объяснить полученные выше результаты в электродном устройстве «провод — провод». По-видимому, значительное снижение напряжения перекрытия для электродов «пластина — пластина» и электродов с острыми выступами на бакелитовом цилиндре возникает из-за наличия нормальной составляющей электрического поля. Эта составляющая практически отсутствует в электродном устройстве «провод — провод». Наличие на поверхности электродов мест с высокой напряженностью электрического поля и нормальной к поверхности диэлектрика составляющей электрического поля вблизи электродов обуславливает формирование разрядного канала при более низких напряжениях. Развитие такого незавершенного поверхностного разряда облегчено, так как оно происходит в резко неоднородных полях без заметной области предварительной ионизации. Иными словами, напряжение перекрытия в основном определяется условиями формирования незавершенных поверхностных разрядов.

<p>Электродное устройство</p> <p>Напряжение перекрытия</p>	<p>Провод-провод</p> <p>Гетинакс</p> <p>Элегаз, $p=2 \text{ ата}$</p>	<p>Гетинакс</p> <p>Пластина-пластина</p> <p>Элегаз, $p=2 \text{ ата}$</p>	<p>Гетинакс</p> <p>Пластина-пластина</p> <p>Элегаз, $p=2 \text{ ата}$</p>	<p>Гетинакс</p> <p>Пластина-пластина</p> <p>Элегаз, $p=2 \text{ ата}$</p>
<p>U, кВ макс</p>	<p>169,7</p>	<p>131,7</p>	<p>102,5</p>	<p>37,5</p>

В таблице приведены результаты исследований, выполненных в ряде других электродных устройств при одном и том же расстоянии между электродами 70 мм. Из приведенного в таблице видно, что наличие значительной нормальной составляющей электрического поля резко снижает напряжения перекрытия в электродном устройстве «пластина — пластина».

Анализируя данные, приведенные выше (рис. 5), можно указать на значительный эффект полярности при симметричных электродах. Напряжение перекрытия при отрицательной полярности приложенного напряжения существенно выше, чем при положительной. Как выяснилось, та степень экранирования заземленного электрода, которая имеет место в металлической камере диаметром 600 мм, оказывает большое влияние на развитие поверхностного разряда в элегазе. Фотографированием и визуальными наблюдениями разрядов с заземленного электрода отмечено не было.

Замедление роста разрядных напряжений с расстоянием (рис. 4) можно объяснить существенно большей ролью условий возникновения поверхностного разряда сравнительно с условиями его распространения. С увеличением расстояния между электродами напряженность у электрода уменьшается для больших расстояний незначительно. Это имеет место как для электродов с острием, так и без него. Значительно более высокие напряжения перекрытия для ровных электродов (кривая 1) объясняется не только отсутствием острия, но и взаимным экранированием кромок ровных кольцевых электродов.

Напряжение перекрытия можно существенно повысить, если принять меры к уменьшению нормальной составляющей электрического поля. Использование с этой целью различного рода экранов (как внутренних, так и внешних) приводит к существенному повышению напряжения перекрытия (см. таблицу). Кроме того, напряжение перекрытия может быть увеличено, если острые выступающие части электродов поднять над изоляционной поверхностью с помощью подкладки таким образом, чтобы края высоковольтного электрода не находились на изоляционной поверхности подкладки, а выступали за нее. Так, например, в электродном устройстве «пластина — пластина» подъем пластины, находящейся под потенциалом, на высоту всего лишь 8 мм приводит к увеличению напряжения перекрытия для расстояния между электродами 70 мм с 102,5 до 135 кВ против 157 кВ для

чисто газового промежутка между аналогичными электродами. Такое существенное повышение напряжения перекрытия может быть объяснено тем, что часть искрового канала развивается в чисто газовом промежутке.

Напряжение перекрытия можно также увеличить путем изолирования электродов. Для электродного устройства «провод — провод» изолирование электродов электрокартоном толщиной 0,8 мм позволяет существенно сократить изоляционные расстояния (рис. 6). Для межэлектродных расстояний более 70 мм рост напряжения перекрытия для изолированных электродов замедляется.

На рис. 7 показана роль изолирования в электродном устройстве «провод — прокладка — плоскость». В качестве изоляции использовалась стеклослюдинитовая лента, обладающая высокой электрической прочностью, и стеклолента. Изоляция из стеклослюдинитовой ленты после намотки запекалась при температуре 150°С, стеклолента после изо-

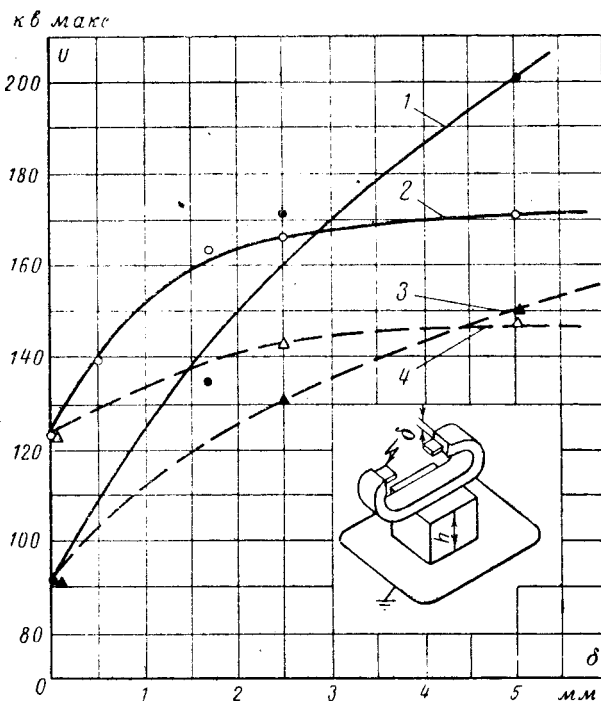


Рис. 7. Импульсное напряжение перекрытия (средние значения) электродного устройства «провод — прокладка — плоскость» в функции толщины изоляции на проводе. Элегаз 2 ата. Расстояние между электродами $\delta+h=24 \text{ мм}$. Материал прокладки — стеклотекстолит.
1 — стеклослюдинит, +1,5/40 мксек; 2 — стеклослюдинит, -1,5/40 мксек; 3 — стеклолента, +1,5/40 мксек; 4 — стеклолента, -1,5/40 мксек.

кВ макс

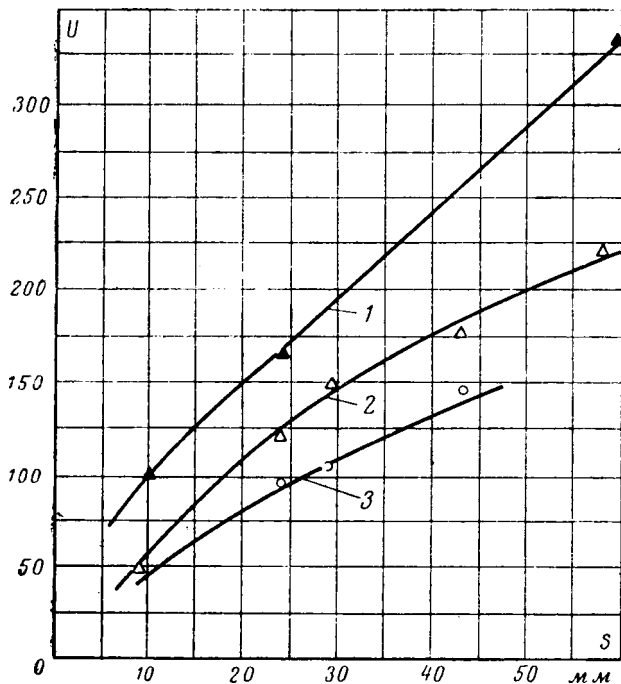


Рис. 8. Напряжение перекрытия (средние значения) электродного устройства «провод — прокладка — плоскость» в функции расстояния между электродами.

Элегаз 2 ата. Материал прокладки — стеклотекстолит.

1 — импульсное напряжение $-1,5/40$ мксек, провод изолирован стеклослюднином $\delta=2,5$ мм; 2 — импульсное напряжение $-1,5/40$ мксек, провод не изолирован; 3 — импульсное напряжение $+1,5/40$ мксек, провод не изолирован.

лирования ею провода пропитывалась лаком МГ-16 с последующей запечкой лака.

Как показали выполненные опыты, эффективность изолирования высоковольтного электрода различна в зависимости от полярности действующего напряжения. При положительной полярности напряжения изолирование играет более существенную роль. Если при положительной полярности для толщины изоляции $\delta=0$ напряжение перекрытия значительно меньше, чем при отрицательной полярности, то с увеличением толщины изоляции на проводе это разрядное напряжение резко возрастает и в случае изолирования стеклослюднином при $\delta > 2,8$ мм становится больше, чем при отрицатель-

ной полярности действующего напряжения. Коэффициент импульса изменяется в пределах 1,13—1,16. Для толщин изоляции до 2,8 мм он меньше при положительной полярности, а для $\delta > 2,8$ мм — при импульсном напряжении отрицательной полярности. Изолирование стеклотекстолитом также является эффективным, хотя и в меньшей степени, средством повышения разрядных характеристик рассмотренного электродного устройства.

На рис. 8 приведена зависимость напряжения перекрытия от расстояния между электродами в случае изолирования провода стеклослюдниновой лентой.

Исследования, проводившиеся на перечисленных электродных устройствах, позволили также установить, что в результате распределения приложенного к промежутку напряжения между твердой изоляцией провода и прокладкой градиент напряжения на твердой изоляции провода весьма значителен. Поэтому наиболее эффективно изолирование провода высокопрочной изоляцией типа стеклослюднитита. Результаты исследований, приведенные на рис. 7, 8, подтверждают это.

Выводы. 1. Средние градиенты потенциала в канале скользящего разряда в элегазе значительно выше, чем в воздухе.

2. Отмечена характерная особенность поверхностного разряда в элегазе, заключающаяся в том, что развитие разряда может происходить без сколь-нибудь значительной области предварительной ионизации.

3. На величину напряжения перекрытия поверхностного разряда в элегазе существенное влияние оказывает нормальная составляющая электрического поля вблизи электродов, а также форма электродов даже в резко неоднородных полях.

4. Изолирование электродов позволяет повысить напряжение поверхностного разряда, причем, наиболее эффективно изолирование электродов высокопрочной изоляцией.

Литература

1. Сысоев М. И., Вопросы изоляции и охлаждения элегазовых трансформаторов, «Электричество», 1964, № 11.
2. Steiniger E., Durchschlagsverhalten von Schwefelhexafluorid bei Gleich-, Wechsel-, und Stoßspannungsbeanspruchung. ETZ—A, 1965, Bd 86, Heft 18.

[18.4.1967]



УДК 621.315.611.015.51

Электрический пробой твердых диэлектриков

Доктор техн. наук, проф. Г. А. ВОРОБЬЕВ

и доктор физ.-мат. наук, проф. А. А. ВОРОБЬЕВ

Томский политехнический институт им. С. М. Кирова

Введение. Явление пробоя твердых диэлектриков может протекать самым различным образом в зависимости от вида твердого диэлектрика, характера воздействия напряжения и других условий, в которых находится твердый диэлектрик (температура, давление, механические воздействия, конфигурация электрического поля и др.). Наиболее частыми формами пробоя твердых диэлектриков являются

электрическая и электротепловая (тепловая). Иногда имеют место электрохимический пробой (развитие дендритов и др.) или старение изоляции под действием ионизационных процессов. В пористых диэлектриках (фарфор и др.) при воздействии высокочастотного напряжения могут возникать специфические формы пробоя [Л. 1].

Электротепловой пробой твердых диэлектриков

обусловлен тем, что при воздействии пробивного напряжения в диэлектрике выделяется тепловой энергии (за счет диэлектрических потерь) больше, чем отводится от диэлектрика наружу, за счет чего температура диэлектрика возрастает до проплавления, прожигания или растрескивания диэлектрика. Пробивное напряжение при электротепловом пробое определяется температурной зависимостью диэлектрических потерь, теплопроводностью диэлектрика, а также в значительной мере условиями охлаждения изделия из диэлектрика.

Основной характерной чертой электрической формы пробоя является то, что перед пробоем не наблюдается нагревания диэлектрика или других каких-либо изменений в нем. Вероятность того, что твердый диэлектрик пробьется вследствие электрического пробоя, возрастает с понижением температуры диэлектрика и с уменьшением длительности воздействия напряжения. Электрический пробой многих полимеров, щелочногалогенидных кристаллов, фарфора и некоторых других твердых диэлектриков происходит при комнатной температуре и при воздействии постоянного напряжения. При повышении температуры до 90 и 150°C наступает электротепловой (тепловой) пробой соответственно фарфора и каменной соли на постоянном напряжении [Л. 2] за счет увеличения тепловыделения.

Пробой бакелизированной бумаги [Л. 3] и некоторых других волокнистых материалов, а также стекла [Л. 2] является тепловым при воздействии постоянного напряжения вследствие их значительной электропроводности. При экспозиции напряжения менее $1-10^{-1}$ сек пробой этих материалов является электрическим, но для тюрингского стекла [Л. 4] и стекла пирекс [Л. 5] электротепловая форма пробоя может наблюдаться вплоть до экспозиций $10^{-3}-10^{-6}$ сек. При воздействии переменного напряжения увеличивается вероятность электротеплового пробоя за счет возрастания диэлектрических потерь и соответственно уменьшается вероятность электрического пробоя.

При электрической форме пробоя твердый диэлектрик обладает наиболее высокой электрической прочностью. При других формах пробоя электрическая прочность твердого диэлектрика существенно снижается.

Электрический пробой твердых диэлектриков изучается уже несколько десятилетий. Было предложено и разрабатывались большое количество гипотез [Л. 6—9], многие из которых оказались весьма далекими от правильного описания процесса пробоя. Уже к концу сороковых годов большинство исследователей склонилось к мнению, что электрический пробой твердых диэлектриков обусловлен ударной ионизацией электронами. Следующие экспериментальные факты служили подтверждением этому:

1. Большая скорость распространения разряда в твердых диэлектриках (10^7 см/сек) [Л. 10], что говорит об электронном характере пробоя.

2. Различная кристаллографическая направленность каналов разряда с электрода-острия различной полярности [Л. 10], что можно объяснить по аналогии с газовым разрядом влиянием объемного

заряда, образующегося в результате ударной ионизации [Л. 11].

3. Развитие разряда с анода в случае однородного поля [Л. 12], что по аналогии с газовым разрядом можно объяснить развитием анодного стримера [Л. 11].

К этому можно добавить факт, установленный позднее и неоднократно, что пробивное напряжение многих твердых диэлектриков при пробое в неоднородном поле выше при отрицательной полярности острия. Это также по аналогии с газовым разрядом может быть объяснено влиянием положительного объемного заряда, образующегося в результате ударной ионизации [Л. 11].

Ниже излагаются сложившиеся к настоящему времени представления об электрическом пробое твердых диэлектриков, основанные на экспериментальных данных, полученных при исследовании в основном щелочногалогенидных кристаллов.

Зависимость электрической прочности твердых диэлектриков от толщины. Электрическое упрочнение диэлектрика с уменьшением его толщины является необходимым следствием механизма ударной ионизации. Однако этот вопрос не был долгое время решен, что часто использовалось в качестве основного возражения против механизма пробоя вследствие ударной ионизации в твердых диэлектриках.

Если связывать пробой твердых диэлектриков с предельным размером электронной лавины $n = e^{ad}$, как это имеет место в случае газового разряда, то электрическая прочность $E_{пр}$ должна непрерывно возрастать с уменьшением толщины d .

По представлениям Фрелиха [Л. 13], $E_{пр}$ твердого диэлектрика должна возрастать с уменьшением d только при таком малом значении $d_{кр}$, когда оно становится сравнимым с длиной свободного пробега электрона.

Прежние экспериментальные результаты по зависимости $E_{пр} = f(d)$ являются разноречивыми. В некоторых исследованиях указывается на отсутствие электрического упрочнения слюды [Л. 14], кристалла KCl [Л. 15], стекла толщиной $10^{-4}-10^{-3}$ см. В [Л. 16] найдено, что $E_{пр}$ слюды начинает возрастать при $d < 1$ мк, что согласуется с ориентировочными расчетами Фрелиха [Л. 13].

В некоторых исследованиях пробоя тонких пленок [Л. 17] и вторичной электронной эмиссии [Л. 18—20] обнаружена повышенная электрическая прочность.

На наш взгляд следующие две причины мешали обнаружению электрического упрочнения твердых диэлектриков:

1. При большой площади электродов в объеме диэлектрика между электродами может быть значительное число дефектов, по которым и происходит пробой при пониженном напряжении, вследствие чего искомый эффект не обнаруживается.

2. При длительном воздействии напряжения в диэлектрике может развиваться электротепловой пробой или может иметь место значительное влияние объемных зарядов. Например, в [Л. 21] указывается, что авторы не обнаружили упрочнения полиэтилентерефталатной (майларовой) пленки при

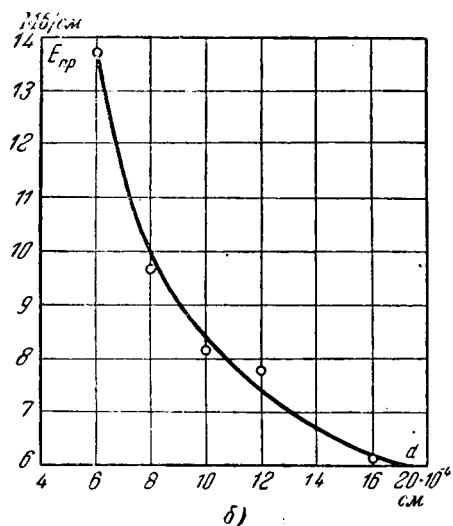
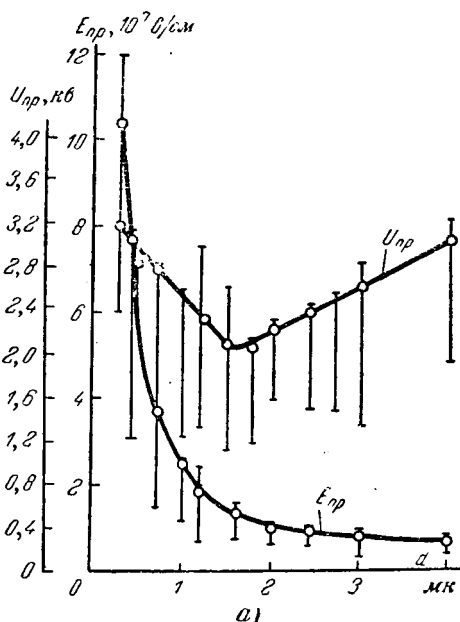


Рис. 1. Зависимости электрической прочности $E_{пр}$ и пробивного напряжения $U_{пр}$ от толщины d для каменной соли (а) и для органического стекла (б).

комнатной температуре, но наблюдали упрочнение при температуре жидкого азота, когда ослабляется влияние тепловыделений. При электротепловом пробое также должно проявляться упрочнение с уменьшением толщины, но, видимо, гораздо слабее, чем при электрическом пробое.

Согласно [Л. 22], причинами необнаружения электрического упрочнения твердых диэлектриков могут быть следующие: малый исследованный диапазон толщин и малое количество исследованных образцов при каждой толщине.

В Томском политехническом институте были разработаны методики получения образцов твердых диэлектриков микронной и субмикронной толщины [Л. 23 и 24]. Electroды имели малый диаметр (0,3—0,5 мм), а слой диэлектрика между электродами был однородным. Диапазон толщин обычно превышал цифру 10. Опыты были проведены на импульсном и постоянном напряжениях. Установлено электрическое упрочнение для кри-

сталлов NaCl, KCl, KBr, KJ, органического стекла и целлулоида [Л. 25—28]. Для каменной соли зависимость $E_{пр}=f(d)$ прослежена в диапазоне толщин $3 \cdot 10^{-5}$ — $2 \cdot 10^{-2}$ см. Во всем этом диапазоне $E_{пр}$ непрерывно возрастает с уменьшением d , что является подтверждением того, что электрический пробой твердых диэлектриков связан с развитием электронной лавины до определенного размера.

На рис. 1 представлены зависимости $E_{пр}=f(d)$ для каменной соли и оргстекла. При $d=0,3$ мк $E_{пр}$ составляет примерно $1 \cdot 10^8$ в/см, что в 50 раз выше значения $E_{пр}$ при $d \approx 10^{-2}$ см. В ряде зарубежных работ [Л. 22, 29 и 30] также установлено электрическое упрочнение для щелочно-галогидных кристаллов, полиэтилена, оргстекла, причем данные [Л. 30] для кристаллов NaCl удовлетворительно согласуются с нашими данными в количественном отношении (рис. 2).

На рис. 3 представлена зависимость $E_{пр}=f(d)$ для слюды [Л. 31]. Здесь $E_{пр}$ довольно слабо возрастает с уменьшением d даже при таких малых значениях d , как 300 Å. По всей вероятности, при пробое слюды на постоянном напряжении имеет место электротепловой пробой. Поэтому данные [Л. 16] не могут служить подтверждением теории Фрелиха [Л. 13].

Выдвинув предположение об электрическом упрочнении твердых диэлектриков [Л. 32], А. Ф. Иоффе предложил [Л. 33] способы создания тонкослойной изоляции. Сейчас можно считать доказанным электрическое упрочнение твердых диэлектриков, и поэтому предложения А. Ф. Иоффе [Л. 33] вновь приобретают определенную актуальность. В слоях твердого диэлектрика толщиной 1—2 мк можно было бы увеличить напряженность поля в 5—8 раз (см. рис. 1) по сравнению со слоями толщиной 20—50 мк, что имело бы значение, например, для изоляции конденсаторов. Реализации идеи А. Ф. Иоффе мешают технологические трудности, так как столь тонкие слои (несколько микрои) значительной площади без дефектов получить не удастся.

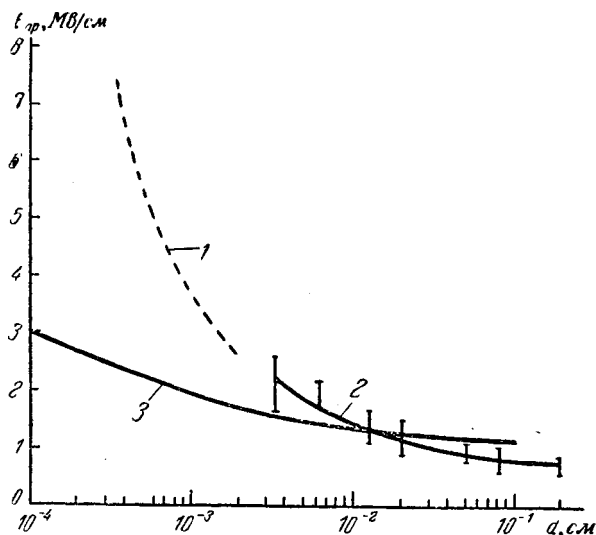


Рис. 2. Зависимости $E_{пр}=f(d)$ для каменной соли. 1 — по данным [Л. 67]; 2 — по данным [Л. 30]; 3 — по данным расчета [Л. 64] по теории Зейтца [Л. 43].

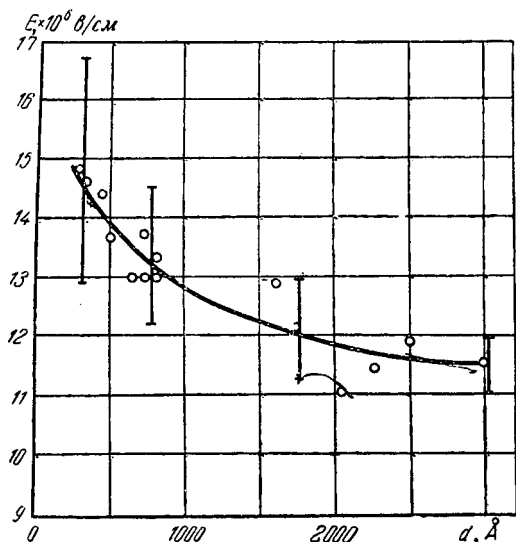


Рис. 3. Зависимость $E_{пр}=f(d)$ для слюды.

Развитие разряда в твердых диэлектриках. Исследование протекания процесса во времени дает наибольшую информацию о природе процесса. Это положение в полной мере относится и к обсуждаемому явлению — электрическому пробоем твердых диэлектриков.

Первые опыты в этом направлении были проведены А. Ф. Вальтером и Л. Д. Инге [Л. 10]. Использовались образцы каменной соли с электродами острие — плоскость. Подавались импульсы напряжения с амплитудой, достаточной для образования неполного пробоя, но недостаточной для полного пробоя. Измерив длину канала неполного пробоя и зная ориентировочно длительность импульса (осциллограф не использовался), можно было определить скорость распространения разряда, составившую 10^7 см/сек. Длина канала неполного пробоя при напряжении, недостаточном для полного пробоя, не должна существенно зависеть от длительности импульса и даже возрастает с уменьшением длительности фронта импульса [Л. 10 и 34]. Поэтому определенная указанным образом скорость разряда может не соответствовать действительности. Подобная же методика приведена в недавно опубликованных работах [Л. 35], где получена скорость распространения разряда в органическом стекле, составившая 10^8 см/сек. Эта цифра много больше значения средней скорости распространения разряда в оргстекле даже в условиях однородного поля [Л. 34] и также вызывает сомнения у других авторов [Л. 36].

В работах, проведенных в Томском политехническом институте, использовались прямоугольные импульсы определенной длительности, напряжение было достаточным для полного пробоя.

В [Л. 37] получены данные по развитию разряда в каменной соли толщиной $d=0,25$ мм в однородном поле при электродах из графита и водного раствора NaCl. В случае графитовых электродов $E_{пр}$ значительно ниже, чем при жидкостных электродах, что будет обсуждаться ниже. При графитовых электродах в образцах наблюдались каналы разряда, идущие с катода. Чем длиннее воздействующий импульс, тем больше длина канала

разряда l_p . В первом приближении зависимость $l_p=f(t)$ имеет прямолинейный характер. Пересечение прямых $l_p=f(t)$ с осью времени определяется различной полярностью и могут быть объяснены влиянием положительного объемного заряда, образующегося в результате ударной ионизации. В случае положительной полярности острия положительный заряд способствует прорастанию разряда в направлении распространения электронной лавины. В случае отрицательной полярности острия положительный объемный заряд препятствует распространению разряда.

Проводящий путь в щелочногалоидных кристаллах образуется в этом случае за счет плавления кристалла, что сопровождается резким увеличением электропроводности [Л. 41].

Зависимость времени разряда от толщины и перенапряжения. Время разряда является его характеристикой, определяемой механизмом разряда. Известно, что результаты измерений Роговского [Л. 42] по времени разряда в воздухе оказались в противоречии с теорией Таунсенда, что явилось толчком к поискам новых объяснений механизма разряда в газах.

На рис. 4 показаны зависимости времени разряда от толщины для кристаллов NaCl, KCl и KBr. Характерным в представленных графиках является наличие двух ветвей и разрыва по времени на стыке ветвей. Правая ветвь находится в согласии с лавиностримерным процессом, если принять экспериментально полученную скорость распространения разряда $v_p=(10^5-10^6)$ см/сек. Левая ветвь характеризуется, в противоположность правой, возрастанием времени разряда с уменьшением толщины. Подобную зависимость предполагает теория Зейтца [Л. 43]. Согласно этой теории лишь отдельные электронные лавины достигают размера, достаточного для разрушения диэлектрика. Вероятность появления такой лавины уменьшается с уменьшением толщины диэлектрика, а следовательно, время разряда, которое будет статистическим, возрастет.

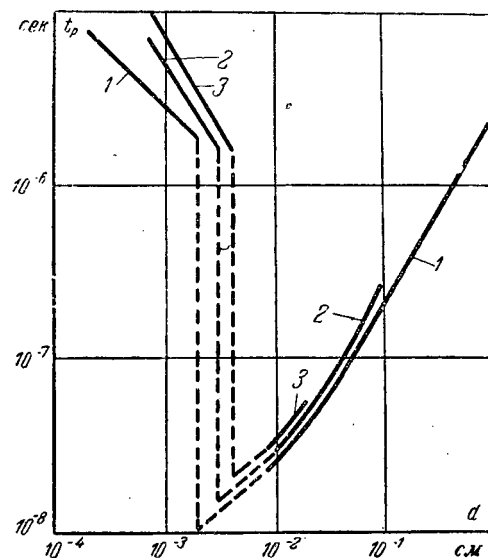


Рис. 4. Зависимости $t_p=f(d)$ для различных кристаллов. 1 — NaCl; 2 — KCl; 3 — KBr.

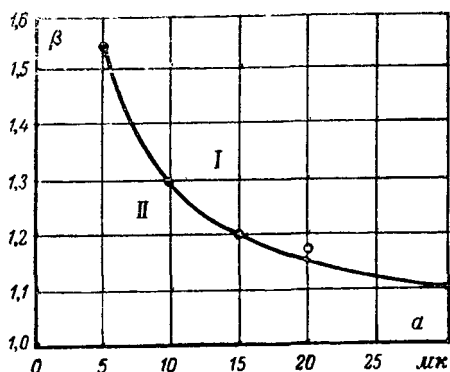


Рис. 5. Граница лавиностримерного и многолавиностримерного разрядов для каменной соли.

Однако, как показано в [Л. 44], теория Зейтца не может объяснить разрыв во времени на границе ветвей. В [Л. 44] также показано, что из теории Зейтца следует уменьшение статистического времени запаздывания с увеличением площади катода, что экспериментально не подтвердилось в [Л. 44]. Поэтому был предложен другой механизм пробоя [Л. 44], соответствующий левой ветви на рис. 4. При некоторой толщине электронная лавина оставляет у анода положительный объемный заряд такой величины, которая уже недостаточна для зарождения стримера. Однако, если к этому заряду добавится объемный заряд еще от одной или нескольких лавин, то стример может зародиться и произойдет пробой. Такой механизм формирования пробоя был назван многолавиностримерным. Так как площадь на аноде, где накапливается положительный объемный заряд, мала, то при наблюдаемом токе эмиссии с катода время накопления объемного заряда у анода, определяющее время разряда, может оказаться значительным и много большим, чем при лавиностримерном механизме. Таким образом объясняется показанный на рис. 4 разрыв во времени между ветвями.

Поскольку большое время разряда характерно для тонких образцов, то образцы, пробившиеся по закономерности левой ветви, могут быть названы «тонкими» образцами, а образцы, пробившиеся по закономерности правой ветви, «толстыми» образцами. Это разделение на «тонкие» и «толстые» образцы является условным, так как любой «тонкий» образец при более или менее значительном перенапряжении пробьется как «толстый», т. е. в результате лавиностримерного пробоя. С другой стороны, многолавиностримерный пробой требует меньшей напряженности поля, чем лавиностримерный и поэтому энергетически более выгоден. Любый «толстый» образец при малом перенапряжении должен пробьется как «тонкий».

На рис. 5 показаны границы лавиностримерного и многолавиностримерного пробоев применительно к каменной соли. Несмотря на указанную условность, понятия «тонкий» и «толстый» образец имеют ясный физический смысл.

Токи в твердых диэлектриках малой толщины. В твердых диэлектриках малой толщины (практически порядка 10^{-4} — 10^{-3} см) возможно создать

электрическое поле с напряженностью $E_0 < E < E_{пр}$, при которой будет происходить ударная ионизация без пробоя образца. Здесь E_0 — напряженность поля, при которой уже заметна ударная ионизация и которая является пробивной, если толщина диэлектрика $d \rightarrow \infty$. Ток ударной ионизации

$$i = i_0 2^{d/\lambda_n \cdot \lambda_n/d},$$

где i_0 — ток эмиссии с катода.

$\lg i = \lg i_0 \frac{\lambda_n}{d} + \frac{d}{\lambda_n} \lg 2$ приблизительно прямо пропорционален d при ее изменении в небольших пределах. Опыты на постоянном напряжении [Л. 45] показали, что в кристаллах NaCl и KCl толщиной 5—20 мк ток растет с увеличением толщины, но эта зависимость далека от прямолинейной. Авторы [Л. 45] сделали вывод, что ими измерен ток ударной ионизации в кристаллах NaCl и KCl, а отклонение от прямой пропорциональности между током и толщиной образца связано с влиянием объемного ионного заряда. Поэтому необходимо было произвести измерения токов на импульсном напряжении, когда можно исключить влияние объемного заряда. Такие измерения были осуществлены [Л. 46—48] для кристаллов KCl и KBr. Первоначальные электроны, начинающие формирование пробоя, появляются в кристалле в результате эмиссии электронов с катода, из-за наличия в диэлектрике у поверхности катода анионных вакансий. Выходящие из катода электроны частично компенсируют положительный заряд анионных вакансий, что обуславливает спад тока со временем в течение 10^{-4} сек. В случае отжига кристалла анионные вакансии объединяются в крупные блоки, подвижность которых падает. Образование агрегатов вакансий приводит к затягиванию фронта импульса тока до $(0,5—1,5) \cdot 10^{-5}$ сек и к снижению его амплитуды. Наоборот, при закалке кристалла в нем имеется большое количество одиночных вакансий. При этом получен крутой фронт импульса тока и большая амплитуда. При последовательной подаче на образец нескольких импульсов напряжения амплитуды токовых импульсов снижаются, и после подачи третьего или четвертого импульса напряжения амплитуда импульса тока становится практически равной нулю. Это явление можно объяснить захватом анионными вакансиями электронов, которые компенсируют положительный заряд анионных вакансий.

Полученные вольт-амперные характеристики хорошо описываются уравнениями автоэлектронной эмиссии. При полях $(1—2) \cdot 10^6$ в/см ток начинает расти с увеличением напряженности поля гораздо быстрее, что объясняется вступлением в действие механизма ударной ионизации.

На рис. 6 представлены зависимости коэффициента ударной ионизации в кристалле KCl от напряженности поля, вычисленные по результатам измерений импульсных токов.

В ряде твердых диэлектриков (органическое стекло, эпоксидная смола, винипласт и др.) не удалось измерить импульсные электронные токи из-за значительных токов поляризации.

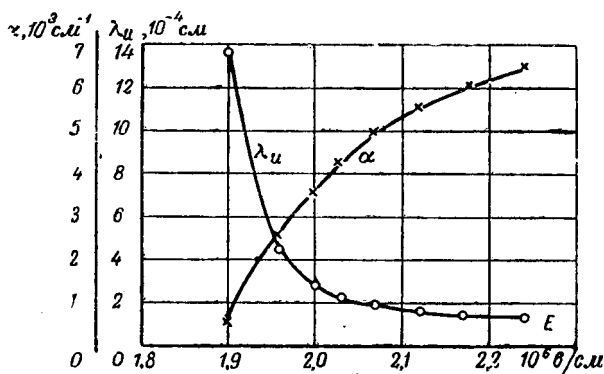


Рис. 6. Зависимости коэффициента ударной ионизации α и межионизационного пробега $\lambda_{и}$ от напряженности поля для кристалла KCl.

Влияние катода на электрическую прочность и механизм пробоя твердых диэлектриков. Вопрос о влиянии материала катода, служащего поставщиком начальных электронов, на электрическую прочность твердого диэлектрика в теоретическом отношении должен решаться в связи с механизмом формирования разряда. При лавиностримерном механизме пробоя, когда для формирования разряда необходим один начальный электрон у катода, материал катода не должен влиять на электрическую прочность диэлектрика. При многолавиностримерном механизме пробоя электрическая прочность диэлектрика зависит от выхода электронов с катода по уравнению, приведенному в [Л. 49],

$$E_{пр} = E_0 + \frac{A}{0,3d} \left[\lg \frac{4\pi\epsilon k}{l} \cdot \frac{1}{V\gamma} \cdot \frac{AE_{пр}}{E_{пр} - E_0} - \frac{1}{2} \lg v_0 \right]$$

где v_0 — число электронов, вышедших с 1 см^2 площади катода за 1 сек ;

E_0 — электрическая прочность при $d \rightarrow \infty$;

A — коэффициент.

В исследованиях, проведенных еще в 30-х годах, не было замечено влияния материала электродов на электрическую прочность твердого диэлектрика, когда в качестве электродов использовались различные металлы, графит, электронный заряд.

В [Л. 50] получено, что $E_{пр}$ кристалла КВг при электродах из водного раствора КВг значительно выше, чем при золотых электродах. Однако в [Л. 51] указывается, что это не подтвердилось.

В исследованиях, проведенных в последние годы в ТПИ для щелочногалогенидных кристаллов с применением жидкостных электродов, регулярно получались более высокие значения электрической прочности, чем в случае применения металлических электродов.

В [Л. 49] обнаружено влияние материала катода на электрическую прочность каменной соли толщиной 100 мк и отсутствие влияния материала анода, что показывает таблица.

В [Л. 52] показано, что поверхность графитового электрода неровная за счет кристаллизации соли в остатках электролита в электродных каналах перед заполнением их графитом. С неровностей на

поверхности катода происходит усиленная эмиссия электронов, что приводит к снижению электрической прочности. Электрод из электролита имеет ровную поверхность.

В случае органического стекла оказалось [Л. 52 и 53], что неровности на катодной поверхности порядка нескольких микрон существенно снижают электрическую прочность.

В [Л. 54] показано, что увеличение выхода электронов из катода, выполненного из раствора NaCl, путем увеличения интенсивности облучения катода ультрафиолетом приводит к снижению электрической прочности каменной соли, причем могут быть получены значения $E_{пр}$ более низкие, чем при графитовом катоде.

Таким образом, можно сделать вывод, что на $E_{пр}$ твердого диэлектрика влияет плотность эмиссионного тока с катода, которая, в частности, зависит от состояния катодной поверхности или облучения катода ионизирующим излучением. В отношении влияния материала катода при одинаковом состоянии катодной поверхности в настоящее время достоверные данные отсутствуют. В [Л. 36] также указывается, что на $E_{пр}$ твердого диэлектрика скорее влияет не материал электродов, а состояние электродных поверхностей.

В [Л. 55] обсуждается механизм пробоя при графитовом катоде. В [Л. 37] получены неполные катодные пробои длиной 10 мк , диаметром порядка $1\text{--}2 \text{ мк}$. Для расплавления каменной соли в таком объеме требуется 10^8 электронов при $E = 1,4 \times 10^6 \text{ в/см}$. Однако при указанном значении E на длине 10 мк за счет ударной ионизации может возникнуть не более 20 электронов [Л. 55]. Следовательно, необходимые 10^8 электронов эмитируются с неровностей графитового катода. Движущееся от катода облако электронов вызывает плавление каменной соли с образованием электропроводящего пути. Часть электронов движется быстрее остальных и на пути производит ударную ионизацию. В результате у анода накапливается положительный объемный заряд, а по пути движения электронов — отрицательный заряд за счет захвата электронов «ловушками». После того, как канал с катода углубится на некоторое расстояние, с анода возникает встречный разряд стримерного характера. В случае медленного подъема напряжения усиленная эмиссия с катода приводит к формированию многолавиностримерного пробоя. В случае пробоя органического стекла разряд происходит с анода [Л. 53 и 56]. Возможно, что при прохождении значительной электронной лавины органическое стекло плавится, но это не приводит к сильному повышению электропроводности расплавленного канала. Углерод в этой стадии разряда еще, вероятно, не выделяется, на что указывается также в [Л. 35]. Таким образом, специфические свойства

Катод	Анод	$E_{пр}, \text{ Мв/см}, \phi = 90\%$	Разброс, Мв/см
Графит	Электролит	1,63	0,3
Графит	Графит	1,66	0,3
Электролит	Электролит	2,13	0,5
Электролит	Графит	2,2	0,6

каждого твердого диэлектрика могут определять разновидность электрического пробоя.

Стадия пробоя твердых диэлектриков. На основании исследований, проведенных в Томском политехническом институте, сформулированы следующие три стадии пробоя твердых диэлектриков [Л. 11 и 57]:

1. Стадия формирования разряда, к концу которой между электродами образуется проводящий путь. При этом твердый диэлектрик частично разрушается (образуются каналы неполных пробоев диаметром в несколько микрон), формирующийся разряд светится, ток протекает небольшой (10^{-4} — 10^{-3} а), посадка напряжения на образце не ощущается [Л. 58—60].

2. Стадия завершения разряда, характеризующаяся быстрым спадом напряжения на образце и соответствующим возрастанием тока. Эта стадия сопровождается сильным разрушением образца [Л. 61 и 62].

3. Послепробойная стадия, в которой происходит разряд источника напряжения через канал пробоя образца.

При уменьшении полного сопротивления в разрядном контуре последние две стадии все более сливаются в одну.

Стадия формирования разряда определяет электрическую прочность диэлектрика и предопределяет протекание процессов в остальных стадиях.

Наибольшее разрушение твердого диэлектрика происходит в двух последующих стадиях. С уменьшением сопротивления в разрядной цепи при пробое может наблюдаться образование сквозных отверстий, появление трещин вокруг канала разряда, разламывание диэлектрика на куски и их разлет на значительные расстояния. Последнее аналогично действию взрывчатого вещества.

Некоторые замечания. 1. *О теориях пробоя твердых диэлектриков.* Выше указывалось, что в последние два десятилетия большинство исследователей склонилось к мнению, что электрический пробой твердых диэлектриков обусловлен ударной ионизацией электронами. По этой причине наиболее полно оказались разработанными именно теории ударной ионизации. Однако они ограничиваются рассмотрением условий ускорения в твердом диэлектрике электронов до энергии, достаточной для ударной ионизации, в них не разбирается по существу процесс пробоя, и поэтому не содержится действительного условия пробоя. Эти теории не могут правильно предсказать зависимость электрической прочности твердого диэлектрика от толщины, что, например, было показано в настоящей статье, и от времени воздействия напряжения. Поэтому указанные теории скорее могут быть названы не теориями пробоя, а теориями ударной ионизации в твердых диэлектриках. В действительных теориях пробоя критерий пробоя должен вытекать из условий развития разряда в пространстве и времени, что, например, имеет место в теории Таунсенда и стримерной теории пробоя газов. Попытки такого рассмотрения предпринимались еще А. Ф. Иоффе [Л. 32] и А. А. Смуровым [Л. 66], позднее Зейтцем [Л. 43] и Стрэттеном [Л. 64], а также

одним из авторов [Л. 65]. Однако действительная теория пробоя твердых диэлектриков и существующие теории ударной ионизации в твердых диэлектриках имеют стык, а именно при $d \rightarrow \infty$ электрическая прочность, определенная из обоих видов теорий, должна иметь одно и то же значение.

2. *Выбор характерного значения электрической прочности.* Электрическая прочность различных образцов одного и того же твердого диэлектрика, пробитых в одинаковых условиях, обнаруживает значительный разброс, составляющий от среднего значения в обе стороны 50% и даже более. При этом различные исследователи принимают различные значения электрической прочности: максимальное, минимальное, среднее, значение при вероятности пробоя $\psi = 90\%$. Такое положение, как справедливо указано в [Л. 36], затрудняет сравнение экспериментальных данных, полученных различными исследователями, и добавляет дополнительные трудности в понимание механизма пробоя твердых диэлектриков. Причинами разброса электрической прочности твердых диэлектриков при пробое в однородном поле могут быть: различная концентрация в твердых диэлектриках микротрещин, дислокаций, вакансий и других структурных нарушений, различная электронная эмиссия с катода вследствие различий в состоянии катодной поверхности.

Можно показать, что все отклонения от идеальной структуры твердого диэлектрика, за исключением, видимо, дислокаций ведут к снижению электрической прочности. Поэтому, на наш взгляд, максимальные значения электрической прочности соответствуют наиболее совершенным образцам твердого диэлектрика. Однако, поскольку максимальные значения могут носить случайный характер, необходимо ввести элемент статистики, чему соответствуют принимаемые нами значения $E_{\text{пр}}$ при вероятности пробоя $\psi = 90\%$. Следует согласиться с [Л. 36], что на графиках зависимостей $E_{\text{пр}}$ или $U_{\text{пр}}$ необходимо указывать величины разбросов.

Задачи дальнейших исследований. Приведенные данные получены на сравнительно небольшом числе материалов, в основном на щелочногалоидных кристаллах, имеющих наиболее простую твердую структуру, и органическом стекле. Практику интересуют данные по пробоем в различных условиях разнообразных твердых диэлектриков, в том числе новейших электроизоляционных материалов, и комбинации различных диэлектриков.

Для создания теории электрического пробоя твердых диэлектриков необходимы данные по токам электронной эмиссии из катода в твердый диэлектрик, развитию ударной ионизации и фотоионизации, по рекомбинационным процессам в твердых диэлектриках. При этом наряду с аналогиями с газовым разрядом необходимо находить отличительные явления и стороны, специфичные для каждого диэлектрика.

Дальнейшее изучение электрического пробоя в твердых диэлектриках позволит обнаружить и новые физические явления. В частности, в последнее время удалось обнаружить свечение в каменной соли при толщине слоя 1 мк и менее [Л. 66].

Литература

1. Волокобинский Ю. М., Механизм пробоя хрупких диэлектриков на высоких и сверхвысоких частотах, ДАН СССР, т. 144, № 6, 1962.
2. Под ред. Вальтера А. Ф., Физика диэлектриков, ГТИ, 1932.
3. Биндер Л., Блуждающие волны в электрических сетях, перевод с нем., Изд. НКТП СССР, 1935.
4. Keller K. J., The measurement of the intrinsic electric strength of glass, *Physica, Haag*, v. 14, 1948; v. 18, 1952.
5. Vermeer J., The impulse breakdown strength of pyrex glass, *Physica, Haag*, v. 20, 1954.
6. Зингерман А. С., Теории пробоя твердых диэлектриков, УФН, том 46, № 4, 1952.
7. Чуенков В. А., Электрический пробой твердых диэлектриков, УФН, том 54, № 2, 1954.
8. Воробьев А. А., Завадовская Е. К., Электрическая прочность твердых диэлектриков, ГИТТЛ, 1956.
9. Сканави Г. И., Физика диэлектриков (область сильных полей), Физматгиз, 1958.
10. Вальтер А. Ф., Инге Л. Д., Электрические разряды в кристаллах, ЖТФ, том I, № 5, 1931.
11. Воробьев А. А., Воробьев Г. А., Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков, изд-во «Высшая школа», 1966.
12. Hippel A., Electric breakdown of solid and liquid insulators, *J. Appl. Phys.*, v. 8, 1937.
13. Fröhlich H., Theory of electric breakdown in ionic crystals, *Proc. Roy. Soc.*, v. 160, 1937.
14. Александров А. П., Иоффе А. Ф., К вопросу об электрической прочности тонких пленок, том. 3, № 1, 1933.
15. Ryu J., Kawamura H., On the thickness effect of dielectric breakdown of mica and *Kil J. Phys. Soc. Japan*, v. 9, 1954.
16. Austen E. W., Whitehead S., The electric strength of some solid dielectrics, *Proc. Roy. Soc., Ser. A*, v. 18, 1940.
17. Plessner K. W., The electric strength of dielectric films, *Proc. Phys. Soc.*, v. 60, 1948.
18. Зернов Д. В., Елинсон Я. И., Левин Н. М., Исследование автоэлектронной эмиссии тонких диэлектрических пленок, Изв. АН СССР, ОТН, том 3, 1944.
19. Зернов Д. В., Кульварская Б. С., К вопросу о вторичноэлектронной эмиссии тонких пленок галоидных соединений щелочных металлов, ЖТФ, том 16, № 1, 1946.
20. Зернов Д. В., Кульварская Б. С., Исследование температурной зависимости электронной эмиссии диэлектрических пленок под влиянием положительного поверхностного заряда, ЖТФ, том 17, № 3, 1947.
21. Jnuichi Y. and Powers D. A., The breakdown of mylar films, *J. Appl. Phys.*, v. 28, № 9, 1957.
22. Cooper R. and Smith W. A., The electric breakdown of sodium chloride, *Proc. Phys. Soc.*, v. 78, № 11, 1961.
23. Воробьев Г. А., Кострыгин В. А., Мурашко Л. Т., Методика получения тонких слоев диэлектриков, ПТЭ, № 5, 1961.
24. Воробьев Г. А., Пикалова И. С., Получение субмикронных слоев однородных твердых диэлектриков, ПТЭ, № 1, 1967.
25. Кострыгин В. А., Исследование запаздывания разряда в монокристаллах NaCl малой толщины, ФТТ, том 2, № 8, 1960.
26. Воробьев А. А., Воробьев Г. А., Кострыгин В. А., К вопросу о зависимости времени пробоя и пробивного напряжения диэлектриков от толщины, Изв. АН СССР, ОТН, Энергетика и автоматика, № 2, 1961.
27. Воробьев А. А., Воробьев Г. А., К вопросу об электрическом пробое твердых диэлектриков, Радиотехника и электроника, том 7, № 9, 1962.
28. Воробьев А. А., Воробьев Г. А., Кострыгин В. А., Зависимость электрической прочности твердых диэлектриков от толщины пробиваемого слоя, Изв. ВУЗов МВ и ССО СССР, Энергетика № 5, 1964.
29. Cooper R., Rowson C. H., Watson D. B., Intrinsic electric strength of polythene, *Nature (Engl.)*, v. 197, № 4868, 1963.
30. Watson D. B., Heyes W., Kao K. C., Calderwood J. H., Some aspects of dielectric breakdown of solids, *Transactions JEEE*, v. E J—1, 2, 1965.
31. Davidson A. T., Joffe A. D., The electric breakdown of thin crystals of mica, *Nature*, v. 206, № 4990, 1965.
32. Иоффе А. Ф., Электрическая и механическая прочность и молекулярные силы, УФН, том 8, № 12, 1928.
33. Иоффе А. Ф., О работах по тонкослойной изоляции, ЖТФ, том I, № 4, 1931.
34. Мельников М. А., Диссертация, 1960, г. Томск.
35. Dittmer B. Z., Zum Mechanismus des elektrischen Durchschlages in festen Isolatoren, *Arch. f. El.*, B. 57, H. 3, 4, 6, 1963.
36. Cooper R., The electric strength of solid dielectrics, *Brit. J. Appl. Phys.*, v. 17, № 2, 1966.
37. Воробьев Г. А., Лисецкая М. Н., Исследование развития разряда в каменной соли в однородном поле, ФТТ, том 6, № 12, 1964.
38. Барченко Т. Н., Мельников М. А., Исследование скорости распространения разряда в кристаллах щелочногалоидных солей, Изв. вузов МВ и ССО СССР, Энергетика, № 7, 1959.
39. Барченко Т. Н., Мельников М. А., О возможности стримерного механизма разряда в твердых диэлектриках, Сб. «Физика диэлектриков», Изд. АН СССР, 1960, стр. 247.
40. Воробьев А. А., Воробьев Г. А., Мельников М. А., Распространение разряда в монокристаллах NaCl и KCl, ФТТ, том 2, № 9, 1960.
41. Беляев А. И., Жемчужная Е. А., Фирсанова Л. А., Физическая химия расплавленных солей, Металлургиздат, 1957.
42. Rogowski W., Durchschlag in Isolatoren, *Arch. f. El.*, Band 18, 1927.
43. Seitz F., On the theory of electron multiplication in crystals, *Phys. Rev.*, v. 76, 1949.
44. Воробьев А. А., Воробьев Г. А., Кострыгин В. А., О механизме электрического пробоя твердых диэлектриков в тонком слое, Изв. АН СССР, ОТН, Энергетика и автоматика, № 4, 1962.
45. Воробьев Г. А., Кострыгин В. А., Кострыгина Н. П., Исследование электропроводности монокристаллов NaCl и KCl в тонком слое, ФТТ, том 3, № 3, 1961.
46. Баранов А. В., К вопросу об измерении импульсных токов в твердых диэлектриках, Сб. «Пробой диэлектриков и полупроводников», изд-во «Энергия», 1964, стр. 190.
47. Баранов А. В., Исследование импульсных пробивных токов в твердых диэлектриках, Сб. «Физика диэлектриков», изд-во «Энергия», 1964, стр. 129.
48. Баранов А. В., Воробьев Г. А., Исследование токов автоэлектронной эмиссии и ударной ионизации в щелочногалоидных кристаллах, Радиотехника и электроника, том 10, № 11, 1965.
49. Воробьев Г. А., Кочербаев Т. К., Влияние материала катода на электрическую прочность твердого диэлектрика, Радиотехника и электроника, том 9, № 3, 1964.
50. Hippel A., Alger R. S., Breakdown of ionic crystals by electron avalanches, *Phys. Rev.*, v. 76, 1949.
51. Cooper R., Grossart D. F., The influence of cathode material on the electric strength of potassium bromide crystals, *Proc. Phys. Soc., Ser. B*, v. 66, 1953.
52. Воробьев Г. А., Некрасова Л. Г., Исследование влияния материала катода на электрическую прочность твердого диэлектрика, ФТТ, том № 4, 1965.
53. Воробьев Г. А., Лисецкая М. Н., Некрасова Л. Г., Механизм пробоя твердых диэлектриков в связи с электронной эмиссией с катода. П. Органическое стекло, ЖТФ, том 36, № 10, 1966.
54. Воробьев Г. А., Лисецкая М. Н., Столярова Л. А., К вопросу об источнике первичных электронов при пробое твердых диэлектриков, Изв. АН СССР, Энергетика и транспорт, № 4, 1966.
55. Воробьев Г. А., Лисецкая М. Н., Механизм пробоя твердых диэлектриков в связи с электронной эмиссией с катода I Щелочногалоидные кристаллы, ЖТФ, том 36, № 10, 1966.
56. Лисецкая М. М., Электрический разряд в оргстекле в однородном поле, Изв. вузов СВ и ССО СССР, Физика, № 5, 1965.
57. Воробьев А. А., Воробьев Г. А., Некоторые закономерности электрического пробоя твердых диэлектриков, Сб. «Пробой диэлектриков и полупроводников», изд-во «Энергия», 1964, стр. 10.
58. Горбин Н. М., Развитие разряда в твердых диэлектриках в неоднородном поле, Изв. АН СССР, ОТН, Энергетика и автоматика, № 1, 1961.

59. Торбин Н. М., Предпробивные токи в больших толщинах в твердых диэлектриках. Изв. вузов МВО СССР, Энергетика, № 10, 1960.

60. Торбин Н. М., Неполный пробой и излучения в кристаллах в сильных электрических полях, ФТТ, том 2, № 10, 1960.

61. Обухов В. И., Некоторые закономерности завершающей стадии пробоя твердых диэлектриков, Изв. вузов МВО СССР, Энергетика, № 7, 1960.

62. Торбин Н. М., Токи при пробое твердых диэлектриков на импульсах, Сб. «Физика диэлектриков», АН СССР, 1960, стр. 415.

63. Смуров А. А., Электротехника высокого напряжения и передача энергии, ГНТИ, 1931, стр. 233.

64. Stratton R., The theory of dielectric breakdown in solids, Progress in dielectrics, v. 4, Heywood—London, 1963.

65. Воробьев Г. А., Формирование разряда в твердых диэлектриках, Изв. АН СССР, ОТН, Энергетика и транспорт, № 2, 1963.

66. Воробьев Г. А., Пикалова И. С., Свечение электрического разряда в каменной соли, Изв. вузов МВ и ССО СССР, Физика, № 6, 1966.

[13.3.1967]



УДК 621.311:681.142

Вопросы алгоритмизации переходных процессов в автономных электроэнергетических системах

Л. П. ВЕРЕТЕННИКОВ и В. П. ЯКОВЛЕВ

Ленинград

Введение. Автономные электроэнергетические системы (АЭС)—судовые, корабельные, самолетные, промышленные и другие, несмотря на свою относительную простоту, требуют, как правило, сложных расчетов переходных процессов. При этом во многих случаях допущения, принимаемые при аналогичных расчетах для сложных объединенных систем, оказываются неприемлемыми.

Указанные обстоятельства определили, с одной стороны, широкое использование полных уравнений Горева—Парка в теории переходных процессов АЭС, а с другой—внедрение в практику исследований и расчетов таких систем метода комплексного моделирования.

В плане использования метода комплексного моделирования в связи с открывшимися в послед-

ние годы более широкими возможностями применения ЦВМ возник вопрос о всестороннем исследовании задачи алгоритмизации переходных процессов в рассматриваемых системах. Появилась необходимость выяснить: нужно ли иметь общий алгоритм расчета процессов в АЭС и соответствующую типовую программу для ЦВМ или можно ограничиться рядом частных алгоритмов и типовых программ для расчета отдельных режимов, например, установившегося режима, токов короткого замыкания, изменения напряжения, статической и динамической устойчивости нагрузки, устойчивости параллельной работы генераторов и т. д.

Для ответа на поставленный вопрос надо рассмотреть особенности частных алгоритмов процессов и их реализацию на ЦВМ, а далее выяснить целесообразность их объединения. Такой путь содействует более полному изучению частных алгоритмов, накоплению типовых программ, которые сразу после отладки могут использоваться в практике проектирования и исследований АЭС. Последовательность изучения алгоритмов может быть принята следующей: установившийся режим и токи короткого замыкания; токи короткого замыкания, изменение напряжения и устойчивость нагрузки; общий алгоритм, охватывающий все перечисленные выше частные режимы автономной системы.

В данной статье рассмотрена первая из перечисленных задач, т. е. особенности алгоритмов установившегося режима и токов короткого замыкания, целесообразность существования частной программы расчета установившегося режима.

Задача решается применительно к типовой схеме системы, представленной на рис. 1. Два синхронных генератора работают на сеть распределения, имеющую три ступени. На каждой ступени асинхронная нагрузка представляется эквивалентным двигателем (на первой ступени предусмотрено увеличение числа двигателей до четырех). На первой и последней ступенях предполагается возможной, кроме асинхронной, статическая смешанная нагрузка. Распределительные щиты соединены фидерами, со-

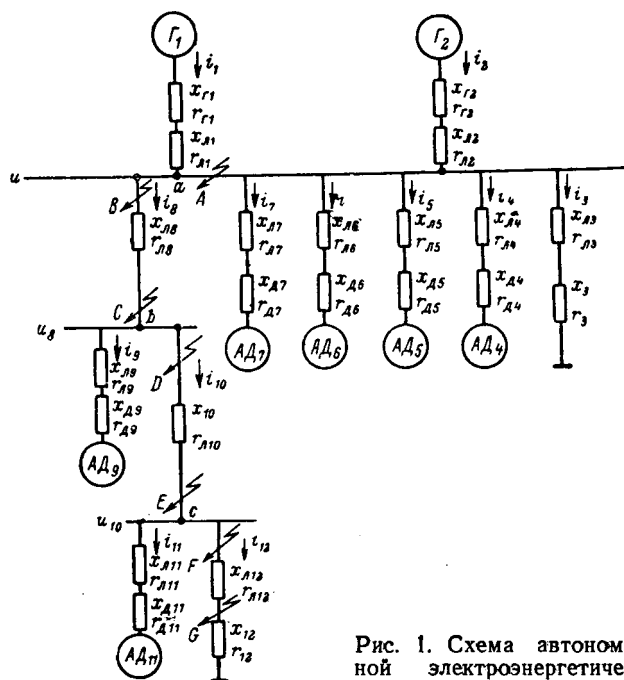


Рис. 1. Схема автономной электроэнергетической системы

противления которых обозначены $x_{л8}$ и $r_{л8}$, $x_{л10}$ и $r_{л10}$. Сопротивления фидеров, с помощью которых подключены к щитам генераторы и нагрузка, обозначены соответственно через $x_{л1}$ и $r_{л1}$, $x_{л2}$ и $r_{л2}$, $x_{л3}$ — $x_{л7}$, $r_{л3}$ — $r_{л7}$, $x_{л9}$ и $r_{л9}$, $x_{л11}$ и $r_{л11}$, $x_{л12}$ и $r_{л12}$.

Алгоритм установившегося режима и его реализация. Задача расчета установившегося режима сводится к определению токов и других параметров режима элементов системы и напряжений в узловых точках схемы рис. 1. Предполагаются заданными: параметры системы, активная мощность каждого потребителя, распределение мощности между генераторами и напряжение на шинах первого щита. В силу того, что полные мощности потребителей и напряжения в узловых точках не известны, задача решается методом последовательных приближений. Поэтому при создании алгоритма установившегося режима особую роль приобретает вопрос о быстрой сходимости процесса расчета.

Алгоритм установившегося режима АЭС можно построить на основе уравнений стационарного режима в осях q, d или уравнений в комплексном виде. В первом случае уравнения получают непосредственно из системы преобразованных дифференциальных

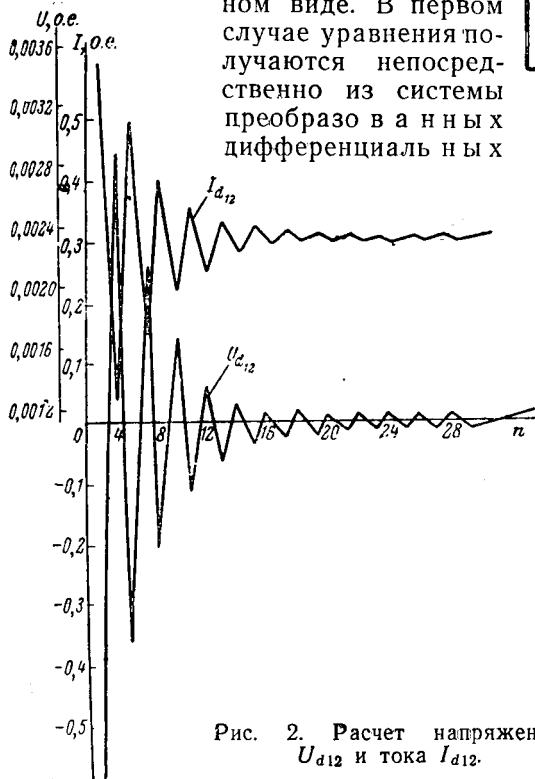


Рис. 2. Расчет напряжения U_{d12} и тока I_{d12} .

¹ Система уравнений составлена так, что уравнения генераторов записаны в осях q, d , жестко связанных с ротором соответствующего генератора, уравнения асинхронных двигателей, статической нагрузки, фидеров — в осях q, d одного из генераторов (первого).

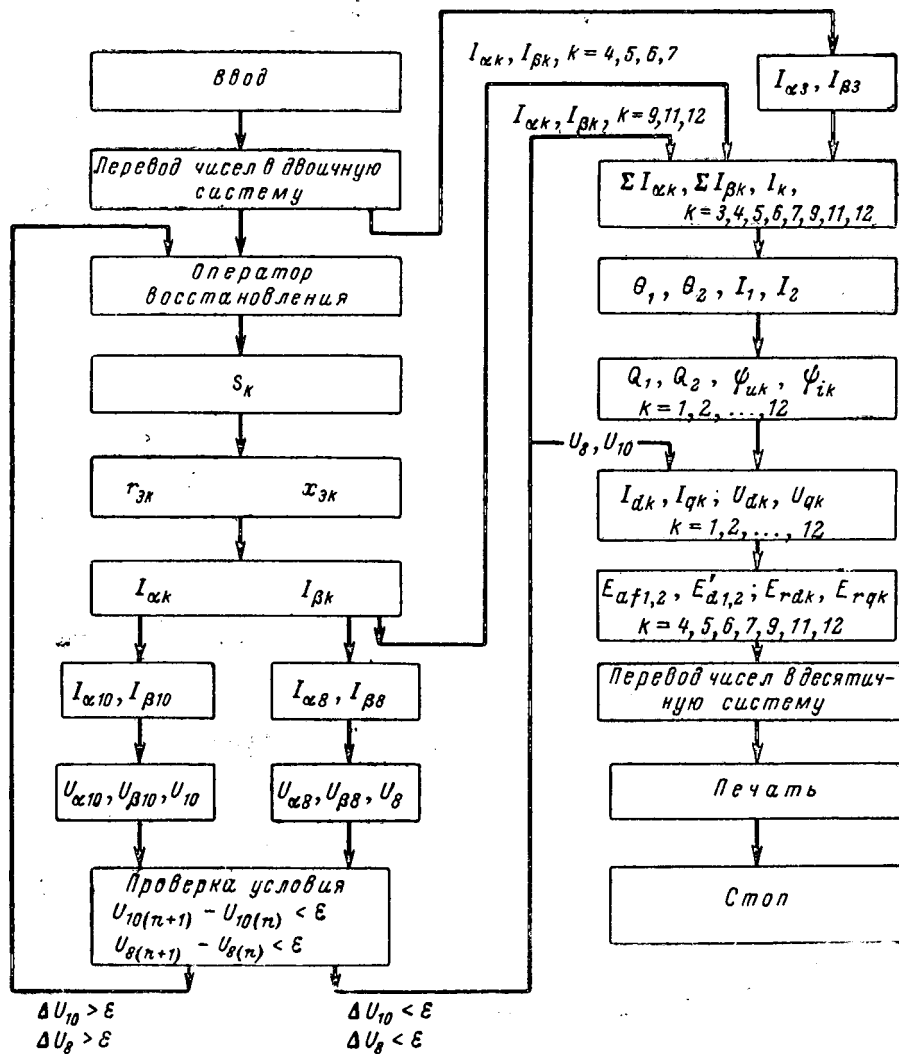


Рис. 3. Блок-схема типовой программы установившегося режима.

уравнений¹ [Л. 1] для схемы рис. 1, во втором — уравнения установившегося режима в осях q, d надо преобразовать к комплексному виду (приложение I).

Алгоритм и программа расчета установившегося режима, построенные на базе уравнений в осях q, d , оказались нерациональными. На рис. 2 представлен процесс вычисления составляющей напряжения U_{d12} (рис. 1) и составляющей тока I_{d12} . Потребовалось 25 итераций, чтобы получить $U_{d12} = U_{q12} = 0$ и разность $I_{12n+1} - I_{12n}$ не превышала 1% (здесь n — индекс итерации). Плохая сходимость в данном случае объясняется тем обстоятельством, что в осях q, d в процесс последовательных приближений оказываются вовлеченными все элементы рассматриваемой системы. Хотя модуль напряжения первого распределительного щита $U=1$, проекции его на оси q и d , U_q и U_d не равны единице. Поэтому при каждом изменении любой переменной любого элемента меняются составляющие по осям q и d всех остальных элементов системы и угол между одноименными осями генераторов θ_{12} , резко влияющий на составляющие переменных по осям q и d .

Иная картина получается при использовании уравнений в комплексном виде. Ось вещественных

значений принимается совпадающей с вектором \bar{U} первого щита, модуль которого в стационарном режиме $U=1=\text{const}$. Это позволяет производить расчет как бы в три этапа: первый — методом последовательных приближений рассчитываются параметры режима цепи распределения от фидера 8 и ниже (рис. 1); второй — вычисляются параметры режима асинхронных двигателей, подключенных к первому щиту, и, наконец, третий — определяются параметры режима генераторов. При этом на двух последних этапах метод последовательных приближений не требуется. В рассмотренном случае сходимость обеспечивается за 3—4 итерации. Машинное время, затрачиваемое на каждую итерацию как в первом, так и во втором случае одинаково и составляет, например, для ЦВМ «Урал-1» около одной минуты. Однако общее время расчета сокращается с 25—30 до 3—5 мин. Кроме того, первая программа требует на 35% больше объема оперативной памяти, в 2 раза больше времени для составления.

Основные зависимости, используемые при расчете режима в соответствии со вторым алгоритмом, приведены в приложении I, а блок-схема типовой программы представлена на рис. 3.

Согласно рис. 3 последовательность расчета установившегося режима системы (рис. 1) сводится к следующему. В качестве исходной информации принимаются активные мощности асинхронных двигателей P_k ($k=4, 5, 6, 7, 9, 11$), напряжение на первом щите $U=1$, распределение активной мощности между генераторами и нагрузка одного из генераторов. Сначала с помощью метода последовательных приближений определяются параметры режима фидеров 8 и 10 и присоединенных к ним асинхронных двигателей AD_k ($k=9, 11$). В соответствии с (I.2) вычисляются скольжения двигателей s_k , эквивалентные сопротивления двигателей $x_{\Sigma k}$ и $r_{\Sigma k}$, а также токи $I_{\alpha k}$ и $I_{\beta k}$. По формуле (I.3) из приложения I — токи $I_{\alpha 12}$ и $I_{\beta 12}$. Здесь индексы α и β указывают, соответственно, на проекции переменных по вещественной и мнимой осям.

В первом приближении принимается $U_k = U_{\alpha k} = 1$ и $U_{\beta k} = 0$. В последующих приближениях эти величины берутся из предыдущих итераций. По формулам (I.4) производится расчет токов и напряжений в следующем порядке: $I_{\alpha 10}$, $I_{\beta 10}$, $I_{\alpha 8}$, $I_{\beta 8}$, $\Delta U_{\alpha 10}$, $\Delta U_{\beta 10}$, $\Delta U_{\alpha 8}$, $\Delta U_{\beta 8}$, $U_{\alpha 10}$, $U_{\beta 10}$, $U_{\alpha 8}$, $U_{\beta 8}$, U_{10} , U_8 . Расчет методом последовательных приближений заканчивается, если выполняются неравенства:

$$\left. \begin{aligned} U_{10n+1} - U_{10n} &< \varepsilon, \\ U_{8n+1} - U_{8n} &< \varepsilon, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где n и $n+1$ — индексы итераций; ε — величина, на которую по соображениям точности расчета допускается разность значений напряжений данной и предыдущей итераций.

Получив указанные разности меньше ε , переходят к расчету параметров нагрузки, подключенной к первому щиту. По формулам (I.3) определяют $I_{\alpha 3}$ и $I_{\beta 3}$, по формулам (I.2) — параметры двигателей AD_4 — AD_7 . При этом напряжение принимается неизменным: $U = U_{\alpha} = 1$; $U_{\beta} = 0$. Далее опре-

деляются общий ток нагрузки (I.4), активные и реактивные мощности генераторов и остальные параметры режима генераторов по формулам (I.1). Наконец, вычисляются параметры режима всех элементов в осях q , d в соответствии с (I.1) и (I.5).

В заключение отметим, что принципиально можно обойтись без использования программы расчета установившегося режима АЭС, так как установившийся режим является частным случаем переходного процесса. Но тогда резко возрастает затрата машинного времени ЦВМ. Время расчета установившегося режима с помощью частной программы на ЦВМ «БЭСМ-2» составляет 20—30 сек. При использовании же программы расчета устойчивости нагрузки (частная программа токов короткого замыкания не может быть применена) время, необходимое для расчета установившегося режима, определяется временем расчета процесса пуска асинхронных двигателей, которое может колебаться в широких пределах в зависимости от параметров системы. В среднем расчет пуска асинхронного двигателя ($t_{\text{пуск}} = 1$ сек) на ЦВМ БЭСМ-2 занимает 15—20 мин машинного времени. Поэтому надо считать вполне целесообразным применение частной программы расчета установившегося режима АЭС.

Алгоритм токов короткого замыкания и его реализация. Общими чертами частных алгоритмов переходных процессов при больших возмущениях в АЭС являются использование преобразованных уравнений в осях q , d , применение метода Рунге—Кутты, запись уравнений в переменных ψ . Целесообразность применения уравнений Горева—Парка общепризнана. Рациональность введения в алгоритм метода Рунге—Кутта показана в [Л. 2]. Наконец, запись уравнений в переменных ψ , как показывает опыт, значительно упрощает выражения для коэффициентов преобразования a_{jk} и облегчает в этой связи реализацию алгоритма на ЦВМ.

При составлении частного алгоритма токов короткого замыкания желательно кроме того принять ряд допущений: замена двух генераторов типовой схемой на рис. 1 одним эквивалентным; равенство скольжения генератора нулю; неизменность скольжения асинхронных двигателей за период короткого замыкания и равенство его начальному $s_k = s_{kH}$; изменение напряжения возбуждения генератора, снабженного системой прямого компаундирования, при коротком замыкании по закону единичной функции от начального U_{fH} до потолочного $U_{f\text{max}}$; отсутствие насыщения магнитной системы машин.

Пределы применимости указанных допущений достаточно изучены, кроме допущения $s_k = s_{kH}$ для асинхронных двигателей. Для АЭС электромагнитный процесс в асинхронном двигателе затухает в пределах 0,04 ÷ 0,05 сек даже при самых неблагоприятных условиях (короткое замыкание в точке В на рис. 1). За это время асинхронные двигатели не успевают существенно изменить скорость и поэтому в области сверхпереходного режима и начала переходного при допущении $s_k = s_{kH}$ подпитка точки короткого замыкания от асинхронных двигателей соответствует действительной картине. Суще-

ственного же потребления энергии асинхронными двигателями при уменьшении их скорости не получается, так как при коротком замыкании за щитами второй и третьей групп распределения время короткого замыкания до срабатывания защиты незначительно, а при коротком замыкании вблизи первого щита точки короткого замыкания надежно шунтируют сопротивление асинхронного двигателя.

Указанные соображения подтверждаются результатами расчетов мгновенного значения фазного тока короткого замыкания $i_{к.з}$ при $s_k = s_{кн}$ и $s_k = \text{varia}$ (используется алгоритм устойчивости нагрузки), произведенными на ЦВМ «БЭСМ-2» для точек C схемы на рис. 1 и приведенных в таблице.

t	$s = s_{кн} = 0,0105$	$s = \text{varia}$	$\Delta i_{к.з}, \%$	Примечание
рад	$i_{к.з}, \text{о. е.}$	$i_{к.з}, \text{о. е.}$		
1,0	1,7543	1,7520	0,131	При вычислении $\Delta i_{к.з}$ за истинное значение приняты $i_{к.з}$ при $s = \text{varia}$
5,0	-2,7370	-2,6667	2,65	
10,0	4,8445	4,8647	0,412	
50,0	-2,8765	-3,0683	6,25	
100,0	-2,2139	-2,1417	3,37	

Учитывая перечисленные допущения и рекомендацию использовать переменные ψ , зависимости, необходимые для расчета токов короткого замыкания, получаются в виде равенств, указанных в приложении II.

Система уравнений (II.1)–(II.6) и метод Рунге—Кутты позволяют построить алгоритм расчета токов короткого замыкания. Последовательность расчета сводится к следующему. Вычисляются параметры установившегося режима в соответствии с алгоритмом установившегося режима. По известным параметрам системы находятся коэффициенты в уравнениях (II.1), (II.2) и (II.6). Затем на основании данных начального режима вычисляются значения напряжений $U_{к0}$ в первый момент после короткого замыкания. Далее согласно методу Рунге—Кутты рассчитываются все потокоцепления на конец первого интервала. После этого расчет повторяется. В каждом интервале, кроме того, вычисляются токи генератора, асинхронных двигателей и фидеров в осях q, d , $i = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}$, фазные токи. При необходимости определяются действующее значение тока i_t , $\int_0^t i_a^2 dt$ и для первого полупериода

производная $\frac{di_t}{dt}$. Расчет прекращается при выполнении условия $t = t_m$, где t_m — заданное время короткого замыкания.

Из отдельных вопросов расчета токов короткого замыкания представляет интерес вычисление начальных значений фазных токов i_a, i_b, i_c и действующего значения тока в процессе короткого замыкания.

Расчет токов короткого замыкания в фазах необходимо производить так, чтобы получить в одной из фаз (например, в фазе a) ударный ток короткого замыкания. Ток в фазе a определяется выражением:

$$i_a = i_d \cos(\gamma_0 + t) - i_q \sin(\gamma_0 + t) \quad (2)$$

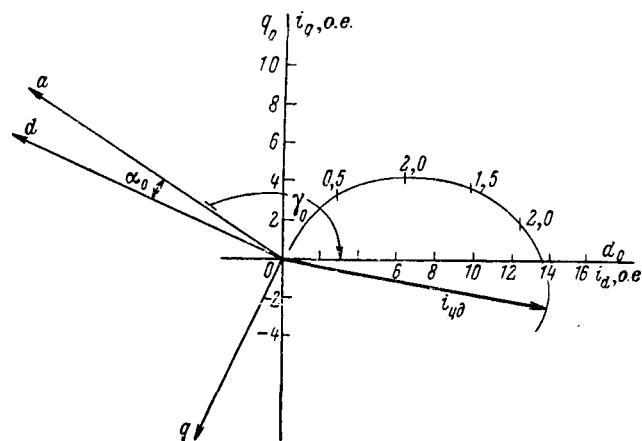


Рис. 4. Годограф тока короткого замыкания.

и равен проекции изображающего вектора тока \vec{i} на ось фазы a . Ударный ток $i_{уд}$ будет иметь место, если ось фазы a совпадает с вектором \vec{i} в момент достижения последним максимальной длины. Этот момент определяется надлежащим выбором угла γ_0 .

Для определения угла γ_0 , соответствующего ударному току, нужно знать годограф вектора тока короткого замыкания (рис. 4), который вычисляется по предварительно рассчитанным в функции времени значениям i_q и i_d в координатах q, d .

Алгоритм расчета сводится к следующему. Сначала находится максимальная длина вектора тока $|\vec{i}_{\max}| = i_{уд} = \sqrt{i_{dуд}^2 + i_{qуд}^2}$ путем сравнения величин i на каждом шаге интегрирования $i_{n-1} < i_{удn} > i_{n+1}$ и фиксируется время $t_{уд}$. Затем вычисляется угол α_0 , определяющий положение фазы a относительно оси d в момент $t_{уд}$:

$$\alpha_0 = \arctg \frac{i_{qуд}}{i_{dуд}}$$

и, наконец,

$$\gamma_0 = -t_{уд} - \alpha_0. \quad (3)$$

Мгновенное значение тока в фазе a в этом случае определяется выражением

$$\begin{aligned} i_a &= i_d \cos(\gamma_0 + t) - i_q \sin(\gamma_0 + t) = \\ &= i_d \cos(-t_{уд} - \alpha_0 + t) - \\ &- i_q \sin(-t_{уд} - \alpha_0 + t). \end{aligned} \quad (4)$$

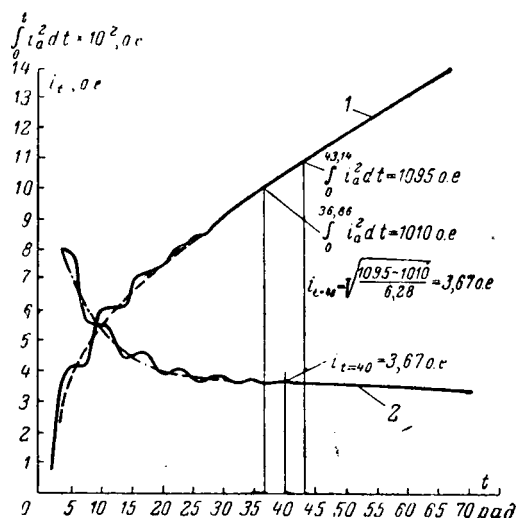
Действующее значение тока короткого замыкания в произвольный момент определяется выражением:

$$i_t = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} i_a^2 dt}, \quad (5)$$

где i_a — мгновенное значение тока в фазе.

Если на ЦВМ вычисляется зависимость $i_a = f(t)$, то без особых затруднений программируется и вычисляется действующее значение тока в соответствии с формулой (5).

На рис. 5 представлена кривая $i_t = f(t)$ при коротком замыкании на зажимах синхронного генератора, вычисленная на ЦВМ «Минск-2».

Рис. 5. К вычислению тока i_t .

1 — кривая $\int_0^t i_a^2 dt$; 2 — кривая тока i_t .

Алгоритм вычисления тока, как следует из выражения (5), не сложен. Однако в оперативной памяти должны запоминаться одновременно все значения токов i_a , соответствующие периоду T . Поэтому расчет i_t связан со значительной нагрузкой

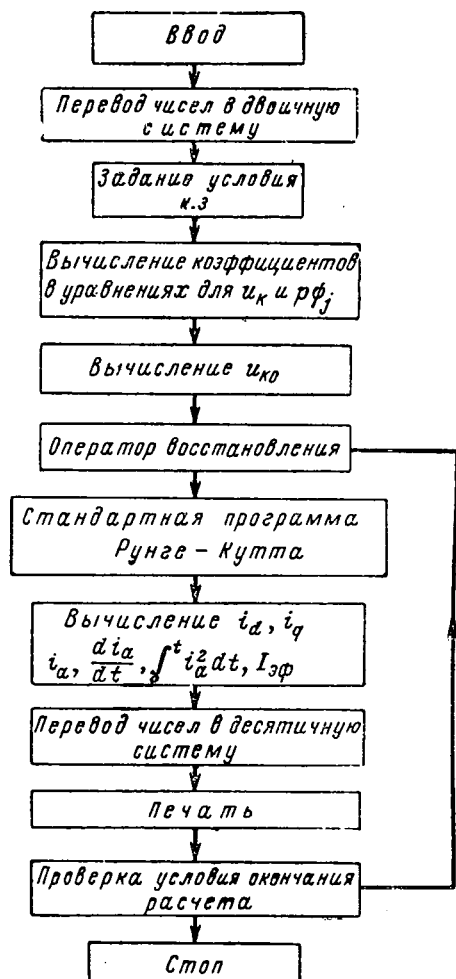


Рис. 6. Блок-схема программы расчета токов короткого замыкания на ЦВМ.

памяти машины. В то же время при расчете токов короткого замыкания на ЦВМ предусматривается

вычисление интеграла $\int_0^t i_a^2 dt$ (рис. 5). В этом случае ток i_t можно вычислить с помощью интегральной кривой

$$\int_0^t i_a^2 dt = f(t). \quad (6)$$

Действительно

$$\begin{aligned} \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} i_a^2 dt &= \int_{t-\frac{T}{2}}^0 i_a^2 dt + \int_0^{t+\frac{T}{2}} i_a^2 dt = \\ &= \int_0^{t+\frac{T}{2}} i_a^2 dt - \int_0^{t-\frac{T}{2}} i_a^2 dt. \end{aligned} \quad (7)$$

Таким образом, для определения тока (5) надо найти разницу в значениях интеграла (6), соответствующую началу и концу периода T , разделить результат на T и извлечь квадратный корень. Когда апериодическая составляющая тока затухла и возможно с некоторой погрешностью пренебречь затуханием периодической составляющей (с момента $t=0,2 \div 0,3$ сек), действующее значение тока можно вычислять по формуле

$$i_t = I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{I_a^2 + I_q^2}}{\sqrt{2}}. \quad (8)$$

Программы расчета токов короткого замыкания в АЭС, реализующие алгоритм токов короткого замыкания, разработаны для ЦВМ типа «Урал-1», «Минск-2», «БЭСМ-2». Блок-схема программы расчета токов короткого замыкания на ЦВМ представлена на рис. 6. Программа предусматривает расчет токов в сети при коротких замыканиях в любой из шести точек, указанных на рис. 1, и состоит из четырех частей: стандартной программы Рунге—Кутты, программы счета правых частей дифференциальных уравнений, программы смены шага интегрирования и программ вычисления токов (фазных, действующего, полного, производной

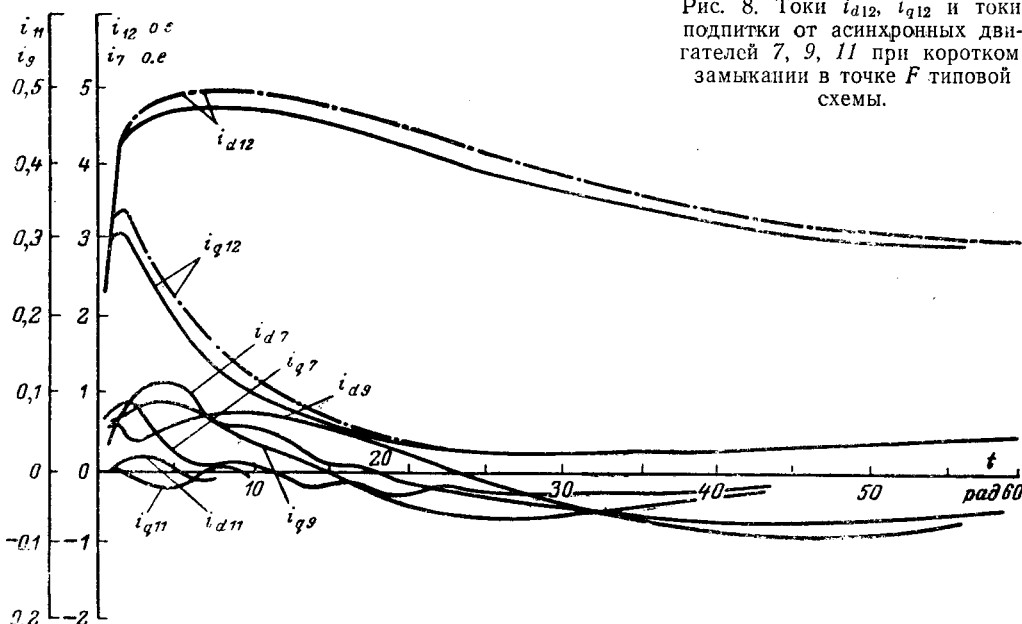
Рис. 7. Ток короткого замыкания на зажимах модельного генератора $U_1=2,5$; $\gamma_0=145^\circ$.

Для обеспечения возможности расчета токов короткого замыкания в различных точках сети АЭС в программе предусмотрены группы команд, которые задают тот или иной вариант расчета. Различие в вариантах состоит в задании условий короткого замыкания и в неодинаковом числе циклов использования уравнений асинхронных двигателей. Например, для точки *A* (рис. 1) условием короткого замыкания является $x_k = r_k = 0$ ($k=8, 10, 12$), и уравнения асинхронных двигателей не используются; для точки *D* — условием короткого замыкания является $x_k = r_k = 0$ ($k=12$), а уравнения асинхронных двигателей используются дважды — для параметров с индексом 7 и 9. Аналогично задаются условия и для других точек.

Программа для ЦВМ «Минск-2» (затрачено 100 ч рабочего времени) составлена полностью в соответствии с блок-схемой на рис. 6. (Для ЦВМ «Урал-1» были приняты уравнения в переменных i .) Продолжительность расчета одного шага численного интегрирования составляет 8—10 сек, время расчета одного варианта (при длительности к. з. $t_m = 0,7$ сек) уменьшилось до 50—70 мин вместо 10—12 ч на ЦВМ «Урал-1». Сокращение машинного времени связано как с увеличением быстродействия машины и уменьшением числа команд (благодаря двухадресному исполнению), так и с введением уравнений в переменных ψ . Наконец, программа для ЦВМ «БЭСМ-2» обеспечила дальнейшее уменьшение продолжительности расчета одного шага до 1—2 сек, а время расчета одного варианта при том же t_m до 10—15 мин.

Для проверки справедливости принятых допущений в процессе создания алгоритма токов короткого замыкания приходилось систематически обращаться к помощи электродинамической модели АЭС. В некоторых случаях, как вспомогательное средство, использовалась аналоговая вычислительная машина (АВМ). В результате существует полная уверенность в достоверности полученного алгоритма. Для иллюстрации на рис. 7 представлена опытная осциллограмма короткого замыкания на зажимах модельного генератора МГ-1000. Результаты расчета на «БЭСМ-2» нанесены на кривую крестиками. Сравнение расчетной и экспериментальной кривых свидетельствует о хорошем совпадении результатов. На рис. 8 приведены результаты расчета на ЦВМ тока короткого замыкания в точке *F* схемы рис. 1 (токи i_{d12} и i_{q12} и отдельно токи подпитки от асинхронных двигателей 7, 9, 11) для одной из АЭС. Кривые токов, изображенные на рис. 8, характеризуют ряд моментов, связанных со значениями токов, ролью подпитки от асинхронных двигателей различных ступеней распре-

Рис. 8. Токи i_{d12} , i_{q12} и токи подпитки от асинхронных двигателей 7, 9, 11 при коротком замыкании в точке *F* типовой схемы.



ления. Так, при заданном (в соответствии со статистикой) распределении мощности асинхронных двигателей по ступеням распределения наибольший ток подпитки точки короткого замыкания *F* приходится на AD_7 (25—30%) и совершенно незначительный на AD_9 и AD_{11} (соответственно 1,8—2,4% и 0,2—0,5%). Время подпитки точки короткого замыкания не превышает 0,05—0,06 сек. Приведенные результаты вычисления токов подпитки от асинхронных двигателей указывают на возможные упрощения расчетной схемы распределения, необходимые при создании альбомов расчетных кривых токов короткого замыкания.

Выводы. 1. Для расчетов установившихся режимов автономных электроэнергетических систем на ЦВМ целесообразно использовать частную программу. Алгоритм установившегося режима рационально основывать на уравнениях в комплексном виде, ибо машинное время при этом в 6—10 раз меньше, чем при использовании программы, построенной на уравнениях в осях q, d .

2. Алгоритм токов короткого замыкания для АЭС целесообразно строить на уравнениях в переменных ψ . В этом случае значительно упрощаются выражения для коэффициентов в уравнениях, приведенных к нормальному виду и в уравнениях связи, что сокращает затраты машинного времени. Допущения, принятые при составлении алгоритма токов короткого замыкания, — неучет скольжения генераторов, неизменность скольжения асинхронных двигателей, неучет насыщения, изменение напряжения по единичной функции — оказываются вполне справедливыми.

Опыт подтверждает возможность использования при расчетах токов короткого замыкания в АЭС на ЦВМ программы без автоматического выбора шага.

При дальнейшей работе по алгоритмизации процессов в АЭС представляет интерес оценка целесообразности объединения алгоритмов расчета токов короткого замыкания в АЭС и расчета устойчивости нагрузки.

Приложение I. Установившийся режим. Основные зависимости для расчета установившегося режима и тока короткого замыкания получены на основе приведенной в [Л. 1] системы уравнений² для автономной электроэнергетической системы, схема которой представлена на рис. 1.

Синхронные генераторы:

$$\left. \begin{aligned} I_k &= I_k e^{-j\varphi_k} = I_{Ak} - jI_{Rk} = \frac{P_{н.р.k} - jQ_{н.р.k}}{U}; \\ I_{н.р.} &= I_1 e^{-j\varphi_1} + I_2 e^{-j\varphi_2}; \\ \dot{E}_{qk} &= E_{qk} e^{j\theta_k} = \dot{U} + (r_k + jx_{qk}) I_k = \dot{U} + z_k I_k; \\ I_{dk} &= I_k \sin(\theta_k - \psi_{dk}) = I_k \sin(\theta_k + \varphi_k); \\ I_{qk} &= I_k \cos(\theta_k - \psi_{dk}) = I_k \cos(\theta_k + \varphi_k); \\ E_{afk} &= E_{qk} + (x_{dk} - x_{qk}) I_{dk}; E'_{dk} = E_{afk} - \\ &\quad - (x_{dk} - x'_{dk}) I_{dk}; \\ P_k &= E_{qk} I_{qk}; Q_k = E_{qk} I_{dk}; \theta_{12} = \theta_1 - \theta_2. \end{aligned} \right\} \quad (I.1)$$

Здесь E_{af}, E_q, E'_{dk} — э. д. с. холостого хода, за поперечной и переходной реактивностями машины;

$P, P_{н.р.}, Q, Q_{н.р.}$ — мощности, соответственно: активная внутренняя и нагрузки, реактивная внутренняя и нагрузки;

$\varphi_k = \psi_{dk} - \psi_{qk} = -\psi_{dk}$ — разность фаз напряжения и тока, $k = 1; 2$.

Асинхронные двигатели:

$$\left. \begin{aligned} I_k &= \frac{\dot{U}_k}{z_{\partial k}} = I_k e^{j\psi_{dk}} = I_{\alpha k} + jI_{\beta k}; \\ z_{\partial k} &= r_{\partial k} + jx_{\partial k}; r_{\partial k} = x_k \frac{\mu_k s_k \rho_{rk}}{\rho_{rk}^2 + s_k^2}; \\ x_{\partial k} &= x_k \frac{\rho_{rk}^2 + s_k^2}{\rho_{rk}^2 + s_k^2}; \\ P_k &= U_k^2 \frac{\mu_k s_k \rho_{rk}}{x_k (\rho_{rk}^2 + s_k^2)}; \\ Q_k &= U_k^2 \frac{\rho_{rk}^2 + s_k^2}{x_k (\rho_{rk}^2 + s_k^2)}; \\ I_{Ak} &= \frac{P_k}{U_k}; I_{Rk} = \frac{Q_k}{U_k}; \\ s_k &= \frac{1}{2} A_k - \sqrt{\left(\frac{A_k}{2}\right)^2 - B_k}. \end{aligned} \right\} \quad (I.2)$$

Здесь $I_{\alpha k}, I_{\beta k}$ — проекции тока I_k на ось вещественных и ось мнимых;

s_k — скольжение асинхронного двигателя;

$z_{\partial k}, x_{\partial k}, r_{\partial k}$ — эквивалентные сопротивления;

$\mu_k, \sigma_k, \rho_{rk}$ — коэффициенты магнитной связи и рассеяния машины, декремент затухания контура ротора;

$k = 4, 5, 6, 7, 9, 11$.

Статическая нагрузка:

$$I_k = \frac{\dot{U}_k}{z_k} = I_k e^{j\psi_{dk}} = I_{\alpha k} + jI_{\beta k}, \quad (I.3)$$

где $k = 3; 12$.

Фидеры и узловые точки a, b, c :

$$\left. \begin{aligned} I_s &= I_s e^{j\psi_{is}} = I_{\alpha s} + jI_{\beta s} = (I_{\alpha 9} + I_{\alpha 10}) + j(I_{\beta 9} + I_{\beta 10}); \\ I_{10} &= I_{10} e^{j\psi_{i10}} = I_{\alpha 10} + jI_{\beta 10} = (I_{\alpha 11} + I_{\alpha 12}) + \\ &\quad + j(I_{\beta 11} + I_{\beta 12}); \\ \Delta \dot{U}_s &= I_s z_s = \Delta U_{\alpha s} + j\Delta U_{\beta s}; \dot{U}_s = \dot{U} - \Delta \dot{U}_s; \\ \Delta \dot{U}_{10} &= I_{10} z_{10} = \Delta U_{\alpha 10} + j\Delta U_{\beta 10}; \dot{U}_{10} = \dot{U}_s - \Delta \dot{U}_{10}; \\ U_s &= \sqrt{U_{\alpha s}^2 + U_{\beta s}^2}; U_{10} = \sqrt{U_{\alpha 10}^2 + U_{\beta 10}^2}; \\ I &= I_1 + I_2 = \Sigma I_{dk} + j\Sigma I_{\beta k} = I_{н.р.} e^{j\psi_i} = I_{н.р.} e^{-j\varphi}, \end{aligned} \right\} \quad (I.4)$$

где $k = 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 12$.

Выражения для обратного преобразования:

$$\left. \begin{aligned} U_{dk} &= U_k \sin(\theta - \psi_{dk}); U_{qk} = U_k \cos(\theta - \psi_{dk}); \\ I_{dk} &= I_k \sin(\theta - \psi_{dk}); I_{qk} = I_k \cos(\theta - \psi_{dk}). \end{aligned} \right\} \quad (I.5)$$

Приложение II. Токи короткого замыкания.

Синхронный генератор:

$$\left. \begin{aligned} p\psi_d &= u_d - \psi_q + \frac{r}{x_s} \psi_{ad} - \frac{r}{x_s} \psi_d; \\ p\psi_q &= -u_q + \psi_d + \frac{r}{x_s} \psi_{aq} - \frac{r}{x_s} \psi_q; \\ p\psi_f &= \frac{1}{T_{d0}} u_f - \frac{x_f}{T_{d0} x_{fs}} \psi_f + \frac{x_{ad}}{T_{d0} x_{fs}} \psi_{ad}; \\ p\psi_{rd} &= -\frac{x_{rd}}{T_{rd} x_{rds}} \psi_{rd} + \frac{x_{ad}}{T_{rd} x_{rds}} \psi_{ad}; \\ p\psi_{rq} &= -\frac{x_{rq}}{T_{rq} x_{rqs}} \psi_{rq} + \frac{x_{aq}}{T_{rq} x_{rqs}} \psi_{aq}. \end{aligned} \right\} \quad (II.1)$$

Асинхронные двигатели

$$\left. \begin{aligned} p\psi_{dk} &= u_{dk} + \psi_{qk} - \frac{r_k}{x_{sk}} \psi_{dk} + \frac{r_k}{x_{sk}} \psi_{adk}; \\ p\psi_{qk} &= u_{qk} - \psi_{dk} - \frac{r_k}{x_{sk}} \psi_{qk} + \frac{r_k}{x_{sk}} \psi_{adk}; \\ p\psi_{rdk} &= \psi_{rqk} s_{kH} - \frac{x_{rk}}{T_{rk} x_{rsk}} \psi_{rdk} + \frac{x_{ak}}{T_{rk} x_{rsk}} \psi_{adk}; \\ p\psi_{rqk} &= -\psi_{rdk} s_{kH} - \frac{x_{rk}}{T_{rk} x_{rsk}} \psi_{rqk} + \frac{x_{ak}}{T_{rk} x_{rsk}} \psi_{aqk}. \end{aligned} \right\} \quad (II.2)$$

Здесь s_{kH} — скольжение в начальном режиме; $k = 4, 5, 6, 7, 9, 11$.

Токи и потокосцепления:

$$\left. \begin{aligned} i_d &= \frac{1}{x_s} \psi_{ad} - \frac{1}{x_s} \psi_d; i_{dk} = \frac{1}{x_{sk}} \psi_{dk} - \frac{1}{x_{sk}} \psi_{adk}; \\ i_q &= -\frac{1}{x_s} \psi_{aq} + \frac{1}{x_s} \psi_q; i_{qk} = \frac{1}{x_{sk}} \psi_{qk} - \frac{1}{x_{sk}} \psi_{aqk}; \\ i_f &= \frac{x_f}{x_{fs}} \psi_f - \frac{x_{ad}}{x_{fs}} \psi_{ad}; i_{rdk} = \frac{x_{rk}}{x_{rsk}} \psi_{rdk} - \\ &\quad - \frac{x_{ak}}{x_{rsk}} \psi_{adk}; \\ i_{rd} &= \frac{x_{rd}}{x_{rds}} \psi_{rd} - \frac{x_{ad}}{x_{rds}} \psi_{ad}; \\ i_{rqk} &= \frac{x_{rk}}{x_{rsk}} \psi_{rqk} - \frac{x_{ak}}{x_{rsk}} \psi_{aqk}; \\ i_{rq} &= \frac{x_{rq}}{x_{rqs}} \psi_{rq} - \frac{x_{aq}}{x_{rqs}} \psi_{aq}; \end{aligned} \right\} \quad (II.3)$$

² Все уравнения записаны в относительных единицах, используемых обычно в работах Р. Парка и А. А. Горева.

$$\left. \begin{aligned} \psi_{ad} &= x_{a1} \left[\left(\frac{1}{x_{fs}} + \frac{1}{x_{ad}} \right) \psi_f + \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{1}{x_{rds}} + \frac{1}{x_{ad}} \right) \psi_{rd} + \frac{1}{x_s} \psi_d \right]; \\ \psi_{aq} &= x_{a2} \left[\left(\frac{1}{x_{rqs}} + \frac{1}{x_{aq}} \right) \psi_{rq} + \frac{1}{x_s} \psi_q \right]; \\ \psi_{adh} &= x_{a3h} \left[\left(\frac{1}{x_{rsh}} + \frac{1}{x_{ah}} \right) \psi_{rdh} + \frac{1}{x_{sh}} \psi_{dh} \right]; \\ \psi_{aqh} &= x_{a3h} \left[\left(\frac{1}{x_{rsh}} + \frac{1}{x_{ah}} \right) \psi_{rqh} + \frac{1}{x_{sh}} \psi_{qh} \right], \end{aligned} \right\} \quad (II.4)$$

где

$$x_{a1} = \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{fs}} + \frac{1}{x_{rds}} + \frac{1}{x_s}};$$

$$x_{a2} = \frac{1}{\frac{1}{x_{aq}} + \frac{1}{x_{rqs}} + \frac{1}{x_s}};$$

$$x_{a3h} = \frac{1}{\frac{1}{x_{ah}} + \frac{1}{x_{rsh}} + \frac{1}{x_{sh}}}.$$

Уравнения связи:

$$\left. \begin{aligned} \text{узел } a: I_{d7} + I_{d8} &= I_d; I_{q7} + I_{q8} = I_q; \\ \text{узел } b: I_{d9} + I_{d10} &= I_{d8}; I_{q9} + I_{q10} = I_{q8}; \\ \text{узел } c: I_{d11} + I_{d12} &= I_{d10}; I_{q11} + I_{q12} = I_{q10}. \end{aligned} \right\} \quad (II.5)$$

Напряжения в узловых точках a, b, c определяются из системы уравнений, полученной при совместном решении уравнений генератора и двигателей, уравнений связи и равенств (II.3), общее выражение которой имеет вид:

$$[y][u] = \sum_k [a_{jk}][\psi_{ik}], \quad (II.6)$$

где $[y]$ — матрица проводимостей;
 $[u]$ — матрица-столбец напряжений;
 $[a_{jk}]$ — матрица коэффициентов при ψ_{ik} ;
 $[\psi_{ik}]$ — матрицы-столбцы потокосцеплений;
 $k = 1, 7, 9, 11$.

Литература

1. Веретенников Л. П., Потапкин А. И. и Раимов М. М., Моделирование, вычислительная техника и переходные процессы в судовых электроэнергетических системах, изд-во «Судостроение», 1964.
2. Каган Б. М. и Тер-Микаэлян Т. М., Решение инженерных задач на автоматических цифровых вычислительных машинах, Госэнергоиздат, 1958.

[29.3.1967]



УДК 621.3.018.782.3

Расчет на ЭЦВМ переходных процессов в сложных электрических схемах методом контурных токов

Канд. техн. наук А. И. СТУПЕЛЬ, инж. В. В. ИЛЬИНИЧНИН

Москва

Расчет на ЭЦВМ электромагнитных переходных процессов в электрических схемах требует составления системы дифференциальных уравнений первого порядка, разрешенных относительно производной.

Запись такой системы для схем, содержащих большое число ветвей и узлов, сопряжена с известными трудностями. В настоящей статье приводится алгоритм составления системы дифференциальных уравнений. При помощи этого алгоритма система может быть составлена как вручную, так и автоматически, на ЭЦВМ.

Основные соотношения. Все ветви, входящие в схему, можно разделить на три группы:

- 1) ветви, содержащие только емкость C (C — ветви);
- 2) ветви R, RC , содержащие активное сопротивление R , но не содержащие индуктивности (R — ветви);
- 3) ветви L, RL, RLC, LC , содержащие индуктивность (L — ветви).

Назовем контуры, составленные только из C — ветвей C — контурами. Контурные токи этих контуров образуют матрицу — столбец I_C , а контурные э. д. с. — матрицу — столбец E_C . Контуры, образованные R — ветвями или C и R — ветвями, назовем R — контурами. Им соответствуют матрицы I_R и E_R . Наконец, контуры, в которые входит хотя

бы одна L — ветвь, назовем L — контурами. Им соответствуют матрицы I_L и E_L . При выбранных обозначениях уравнение контурных токов схемы замещения запишется следующим образом:¹

$$\begin{aligned} & p \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_C \\ I_R \\ I_L \end{bmatrix} + \\ & + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{RR} & R_{RL} \\ 0 & R_{LR} & R_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_C \\ I_R \\ I_L \end{bmatrix} + \\ & + \frac{1}{p} \begin{bmatrix} \tilde{C}_{CC} & \tilde{C}_{CR} & \tilde{C}_{CL} \\ \tilde{C}_{RC} & \tilde{C}_{RR} & \tilde{C}_{RL} \\ \tilde{C}_{LC} & \tilde{C}_{LR} & \tilde{C}_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_C \\ I_R \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_C \\ E_R \\ E_L \end{bmatrix}, \quad (1) \end{aligned}$$

где

$$p \equiv \frac{d}{dt}, \quad \frac{1}{p} \equiv \int_0^t$$

$L_{ij}, R_{ij}, \tilde{C}_{ij}$ ($i = R, L, C; j = R, L, C$) — матрицы собственных и взаимных индуктивностей, активных

¹ Предполагается, что все элементы схемы линейны. Нелинейные характеристики аппроксимируются кусочно-линейными.

сопротивлений и инверсных емкостей $\left(\tilde{C} = \frac{1}{C}\right) L, R$ и C — контуров.

Очевидно, что (по определению) матрицы собственных индуктивностей C и R — контуров и матрицы взаимных индуктивностей этих контуров с L — контурами равны нулю. Аналогично равны нулю матрицы собственных активных сопротивлений C — контуров и соответствующих взаимных сопротивлений.

Обозначив

$$\frac{1}{p} I_{Cj} = Q_C + Q_{C0};$$

$$\frac{1}{p} I_L = Q_L + Q_{L0};$$

$$\frac{1}{p} I_R = Q_R + Q_{R0}$$

и перемножив соответствующие матрицы в (1), получим искомую систему уравнений первого порядка, разрешенных относительно производной:

$$\begin{aligned} pI_L = & L_{LL}^{-1} [E_L - R_{LR} I_R - R_{LL} I_L - \\ & - \tilde{C}_{LC} (Q_C + Q_{C0}) - \tilde{C}_{LR} (Q_R + Q_{R0}) - \\ & - \tilde{C}_{LL} (Q_L + Q_{L0})]; \end{aligned} \quad (2a)$$

$$pQ_L = I_L; \quad (2б)$$

$$pQ_R = I_R; \quad (2в)$$

$$\begin{aligned} I_R = & R_{RR}^{-1} [E_R - R_{RL} I_L - \tilde{C}_{RC} (Q_C + Q_{C0}) - \\ & - \tilde{C}_{RR} (Q_R + Q_{R0}) - \tilde{C}_{RL} (Q_L + Q_{L0})]; \end{aligned} \quad (2г)$$

$$\begin{aligned} Q_C = & \tilde{C}_{CC}^{-1} [E_C - \tilde{C}_{CR} (Q_R + Q_{R0}) - \\ & - \tilde{C}_{CL} (Q_L + Q_{L0})] - Q_{C0}. \end{aligned} \quad (2д)$$

По известным при $t=0$ $I_{L0}, Q_{R0}, Q_{L0}, Q_{C0}$ из уравнения (2г) определяется I_{R0} и затем из уравнений (2а), (2б) и (2в) значения I_L, Q_L и Q_R при $t=\Delta t$ (Δt — шаг расчета), из уравнения (2д) — значение Q_C при $t=\Delta t$. Затем из (2г) определяется I_R при $t=\Delta t$ и процедура повторяется.

Матрицы L_{ij}, R_{ij} и C_{ij} определяются исходя из известного соотношения [Л. 1]

$$Z_K = NZ_B N^t, \quad (3)$$

где Z_K — матрица контурных сопротивлений схемы, Z_B — матрица сопротивлений ветвей, N — вторая матрица инцидентности (столбцы соответствуют ветвям схемы, строки — контурам), N^t — транспонированная матрица N . Пронумеруем контуры схемы в следующем порядке: сперва C — контуры, затем R — контуры и, наконец, L — контуры. В аналогичной последовательности пронумеруем C — и R — ветви схемы. Тогда выражение (3) можно переписать в виде произведения клеточных матриц:

$$\begin{aligned} & \begin{matrix} C- & R- & L- \\ \begin{bmatrix} N_{CC} & 0 & 0 \\ N_{RC} & N_{RR} & 0 \\ N_{LC} & N_{LR} & N_{LL} \end{bmatrix} \end{matrix} \left\{ \frac{1}{p} \begin{bmatrix} \tilde{C}_{BC} & 0 & 0 \\ 0 & C_{BR} & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{C}_{BL} \end{bmatrix} + \right. \\ & \left. + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{BR} & 0 \\ 0 & 0 & R_{BL} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{BL} \end{bmatrix} \right\} \times \\ & \times \begin{bmatrix} N_{CC}^t & N_{RC}^t & N_{LC}^t \\ 0 & N_{RR}^t & N_{LR}^t \\ 0 & 0 & N_{LL}^t \end{bmatrix} = Z_K(p), \end{aligned} \quad (4)$$

где N_{ij} — матрица инцидентности контуров типа i и ветвей типа j ($i, j = C, R, L$), индекс „в“ означает, что в соответствующую матрицу входят параметры ветвей.

Из (4) легко получить приведенные в таблице выражения для матриц $\tilde{C}_{ij}, R_{ij}, L_{ij}$. Эти матрицы могут быть также получены непосредственно путем обхода контуров схемы.

Выбор независимых контуров. Очевидно, что матрицы L_{LL}, R_{RR}, C_{CC} , входящие в систему уравнений (2) должны быть неособенными. При произвольном выборе L —, R — и C — контуров это требование может не выполняться. Покажем это на примере схемы рис. 1, а, выбрав в качестве независимых следующие семь контуров: 1 — (2352), 2 — (34653), 3 — (12341), 4 — (12871), 5 — (87658), 6 — (2852), 7 — (3853).

Выражения для матриц $\tilde{C}_{ij}, R_{ij}, L_{ij}$

\tilde{C}_{LL}	\tilde{C}_{RR}	\tilde{C}_{CC}	\tilde{C}_{CL}	\tilde{C}_{CR}
$N_{LC} \tilde{C}_{BC} N_{LC}^t + N_{LR} \tilde{C}_{BR} N_{LR}^t + N_{LL} \tilde{C}_{BL} N_{LL}^t$	$N_{RC} \tilde{C}_{BC} N_{RC}^t + N_{RR} \tilde{C}_{BR} N_{RR}^t$	$N_{CC} \tilde{C}_{BC} N_{CC}^t$	$N_{CC} \tilde{C}_{BC} N_{CC}^t$	$N_{CC} \tilde{C}_{BC} N_{RC}^t$
\tilde{C}_{RL}	R_{RR}	R_{LL}	R_{RL}	L_{LL}
$N_{RC} \tilde{C}_{BC} N_{LC}^t + N_{RR} \tilde{C}_{BR} N_{LR}^t$	$N_{RR} R_{BR} N_{RR}^t$	$N_{LR} R_{BR} N_{LR}^t + N_{LL} R_{BL} N_{LL}^t$	$N_{RR} R_{BR} N_{LR}^t$	$N_{LL} L_{BL} N_{LL}^t$

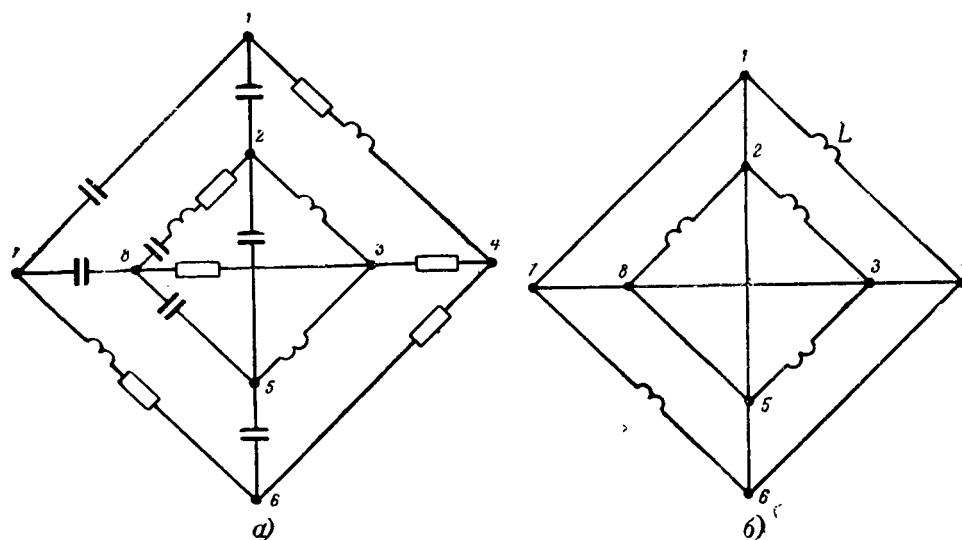


Рис. 1. К выбору независимых контуров.

а — исходная схема с произвольно выбранными независимыми контурами; б — преобразованная схема, описываемая матрицей L_{LL} .

Из схемы видно, что все выбранные контуры являются L — контурами. Матрица

$$L_{LL} = \begin{bmatrix} L_{23} - L_{35} & -L_{35} & L_{23} & 0 & 0 & 0 & L_{25} \\ -L_{35} & L_{35} & 0 & 0 & 0 & 0 & -L_{35} \\ L_{23} & 0 & L_{14} - L_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_{28} & 0 & -L_{28} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_{67} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -L_{28} & 0 & L_{28} & 0 \\ L_{35} & -L_{35} & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{35} \end{bmatrix} \quad (5)$$

получилась особенной (сумма четвертой и шестой строк равна нулю).

Выясним причины, порождающие особенность матрицы L_{LL} или R_{RR} и $\sim \tilde{C}_{CC}$. Если в схеме замещения разомкнуть все ветви, являющиеся хордами² C — и R — контуров, а в остальных ветвях закоротить емкости и активные сопротивления, то контурные токи в получившейся преобразованной схеме определяются матрицей L — контуров L_{LL} . Преобразованная схема может содержать короткозамкнутые ветви, у которых $L_B = C_B = R_B = 0$. Можно показать, что матрица L_{LL} является особенной только в том случае, если короткозамкнутые ветви преобразованной схемы образуют хотя бы один короткозамкнутый контур. Обозначим через L'_{LL} матрицу контурных индуктивностей преобразованной схемы при выборе короткозамкнутого контура в качестве независимого. Матрица L_{LL} связана с L'_{LL} соотношением [Л. 2]:

$$L_{LL} = Q^T L'_{LL} Q, \quad (6)$$

где Q — неособенная квадратная матрица. Очевидно, что L'_{LL} — особенная, т. к. строка, соответствующая короткозамкнутому контуру, состоит из нулей. Из (6) следует, что L_{LL} также является особенной.

² Под хордой понимается ветвь, по которой протекает ток только данного контура.

Если в преобразованной схеме отсутствуют короткозамкнутые контуры, то при любом выборе независимых контуров преобразованной схемы ни одна из строк матрицы L_{LL} не состоит из нулей и не является линейной комбинацией остальных строк (т. е. контуры независимы). Следовательно, L_{LL} не является особенной.

Схема, преобразованная из схемы рис. 1, а, содержит два короткозамкнутых контура (рис. 1, б): (346583) и (125871). Поэтому матрица (5) получилась особенной.

Условие отсутствия короткозамкнутых контуров в преобразованных схемах выполняется, если хордой каждого L — контура является L — ветвь, а хордой каждого R — контура

R — ветвь (хордой C — контура всегда является C — ветвь). Тогда в соответствующей преобразованной схеме (L или R) короткозамкнутые ветви могут входить только в дерево схемы и не образуют контуров. Отсюда следует также, что матрица \tilde{C}_{CC} всегда неособенная.

Приведенные соображения позволяют рекомендовать процедуру выбора такой системы независимых контуров, для которой матрицы L_{LL} и R_{RR} не являются особенными. Удалим из схемы все L — и R — ветви. Оставшиеся ветви образуют систему независимых C — контуров. К этой системе добавляются по одной R — ветви. Если добавление R — ветви приводит к образованию нового контура, то эта ветвь считается его хордой. Аналогичным образом происходит добавление L — ветвей. Таким образом, все R — и L — контуры имеют своими хордами R — и L — ветви соответственно. А это означает, что в соответствующих преобразованных схемах отсутствуют короткозамкнутые контуры и матрицы R_{RR} и L_{LL} не являются особенными.

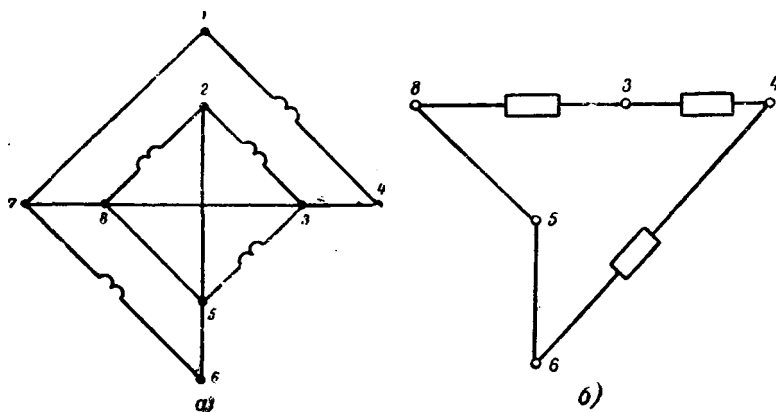
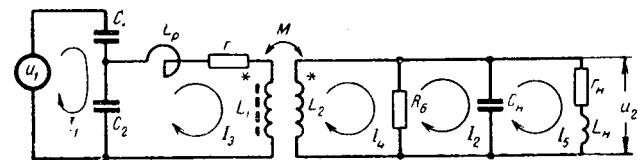


Рис. 2. Преобразованные схемы при выборе независимых контуров согласно алгоритму.

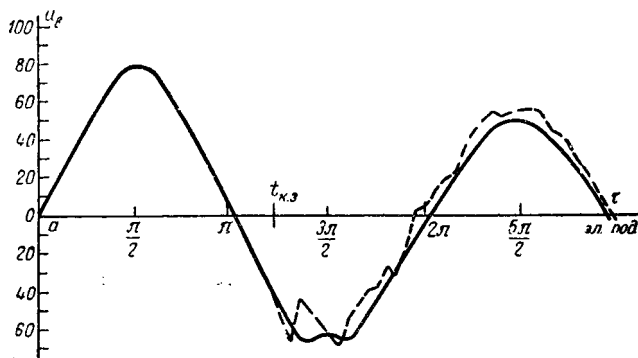
а — схема, описываемая матрицей L_{LL} ; б — схема, описываемая матрицей R_{RR} .

Пользуясь указанной процедурой, выберем независимые контуры в схеме рис. 1: C — контур — 125871; R — контур — 465834; L — контуры — 32583; 143871; 76587; 8258; 3583 (подчеркнуты ребра, являющиеся хордами).

Соответствующие преобразованные схемы (рис. 2, а, б) не содержат короткозамкнутых контуров и, следовательно, матрицы L_{LL} и R_{RR} неособенные.



а)



б)

Рис. 3.

а — схема замещения емкостного трансформатора напряжения с нагрузкой; I_1, I_2, I_3 — контурные токи, $C_1 = 4 \cdot 10^3$ пф, $C_2 = 107 \cdot 10^3$ пф, $L_p = 85,6$ гн, $r = 2380$ ом, $L_1 = 5 \cdot 10^3$ гн, $L_2 = 0,106$ гн, $M = 23$ гн, $R_6 = 4$ ом, $C_H = 32 \cdot 10^6$ пф, $r_H = 50$ ом, $L_H = 0,16$ гн; б — кривые первичного (u_1) и вторичного (u_2) напряжений, приведенных к стороне u_2 . — — — — — u_1 ; — — — — — u_2 ; $t_{k,3}$ — момент короткого замыкания.

Пример. На рис. 3, а представлены схема и параметры емкостного трансформатора напряжения [Л. 3] и его вторичной цепи. Кривые первичного u_1 и вторичного u_2 напряжения фазы трансформатора приведены на рис. 3, б. Переходный процесс в трансформаторе возникает при изменении первичного напряжения вследствие однофазного короткого замыкания в конце линии, к которой присоединен трансформатор. Матрицы, входящие в систему уравнений (2), имеют следующий вид (контурные токи показаны на рис. 3, а):

$$I_L = \begin{bmatrix} I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix}; I_R = [I_2]; I_C = [I_1];$$

$$E_L = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; E_R = [0]; E_C = [u_1];$$

$$L_{LL} = \begin{bmatrix} L & -M & 0 \\ -M & L_2 & 0 \\ 0 & 0 & L_H \end{bmatrix}; R_{LL} = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & R_6 & 0 \\ 0 & 0 & r_H \end{bmatrix};$$

$$R_{RR} = [R_6]; R_{RL} = [0 \quad -R_6 \quad 0];$$

$$\tilde{C}_{CC} = [\tilde{C}_1 + \tilde{C}_2]; \tilde{C}_{RR} = [\tilde{C}_H];$$

$$\tilde{C}_{LL} = \begin{bmatrix} \tilde{C}_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{C}_H \end{bmatrix}; \tilde{C}_{CR} = [0]; \tilde{C}_{CL} = [-\tilde{C}_2 \quad 0 \quad 0];$$

$$\tilde{C}_{RL} = [0 \quad 0 \quad -\tilde{C}_H].$$

Литература

1. Мельников Н. А., Матричный метод анализа электрических цепей, «Энергия», 1966.
2. Максимович Н. Г., Линейные электрические цепи и их преобразования, Госэнергоиздат, 1961.
3. Дымков А. М., Трансформаторы напряжения, Госэнергоиздат, 1963.

[29.5.1967]



УДК /621.314.01+621.318.43/017.3.001.24

Расчет местных и общих потерь в пластинах, пронизываемых потоком рассеяния трансформатора или реактора

Канд. техн. наук Д. Н. МОРОЗОВ

Москва

В трансформаторах, реакторах и вращающихся электрических машинах имеются плоские немагнитные детали и участки шихтованных сердечников, в которых нормальная к пластине составляющая потока рассеяния, полностью затухающая на глубине нескольких листов, вызывает неравномерно распределенные потери и местные нагревы. Такими являются пакеты стержня трансформатора и пакеты — вставки стержневого реактора, немагнитные стяжные пластины и электростатические экраны трансформатора и т. п.

Опыт исследования добавочных потерь указывает на возможность общего подхода к задаче о вихревых токах во всех таких пластинах, толщина которых меньше глубины проникновения электромагнитной волны.

В статье показан метод определения вихревых токов в тонкой прямоугольной пластине при любом

заданном распределении нормальной к ней индукции. Полученные решения применены, в частности, для уточнения методики расчетов местных и общих потерь в стержне трансформатора [Л. 1].

Постановка задачи. Распределение нормальной составляющей результирующей индукции рассеяния B_z у поверхности и по глубине пакета считаем заданным (из расчетов или измерений). Будем искать распределение вихревых токов только в плоскости первой «магнитно-прозрачной» пластины (рис. 1), полагая, что в последующих — токи затухают так же, как и нормальная составляющая потока — по экспоненциальному закону, известному из опыта. Принимаем, что по толщине первой пластины индукция B_z не изменяется.

Составляющая плотности тока σ_z и изменение по z составляющих σ_x и σ_y , очевидно, равны нулю. При этих условиях второе уравнение Максвелла

(для среды с постоянной магнитной проницаемостью и при синусоидально изменяющейся во времени индукции) для комплексных амплитуд вектора плотности тока принимает вид:

$$\frac{\partial \dot{\sigma}_{my}}{\partial x} - \frac{\partial \dot{\sigma}_{mx}}{\partial y} = -j\omega\gamma \dot{B}_{mz}(x, y), \quad (1)$$

где $\dot{B}_{mz}(x, y)$ — комплексная амплитуда индукции в точке (x, y) ; $\gamma = \rho^{-1}$ — удельная электропроводность пластины.

Обычным путем уравнение (1) приводится к уравнению Пуассона (3а). Для этого вводится такая функция \dot{F} , чтобы

$$\text{rot } \dot{F} = \dot{\sigma} \quad (2)$$

и берется

$$\text{grad div } \dot{F} - \nabla^2 \dot{F} = -j\omega\gamma \dot{B}. \quad (3)$$

Так как в рассматриваемом случае вектор F имеет только одну составляющую F_z , не зависящую от z , то $\text{div } F = \partial F_z / \partial z = 0$, а векторное уравнение (3) становится скалярным уравнением Пуассона:

$$\frac{\partial^2 F_{mz}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F_{mz}}{\partial y^2} = j\omega\gamma B_{mz}(x, y). \quad (3a)$$

Интегрируя уравнение (3а) при нулевых граничных условиях (задача Дирихле), найдем в соответствии с (2) составляющие плотности токов¹

$$\left. \begin{aligned} \dot{\sigma}_x &= \frac{\partial \dot{F}_z}{\partial y}, \\ \dot{\sigma}_y &= -\frac{\partial \dot{F}_z}{\partial x}. \end{aligned} \right\} \quad (2a)$$

Вектор \dot{F} можно трактовать и как вектор магнитной напряженности поля и как векторный потенциал плотности тока. В [Л. 2] функция F_z названа током, протекающим через любое сечение от заданной точки (x, y) до края бесконечно тонкой пластинки, в которой рассматривается поверхностная плотность вихревого тока и удельное поверхностное сопротивление. Условие $F_z = 0$ на границах означает отсутствие нормальных к границе токов.

Найдем распределение токов в крайних пластинах сердечников трансформаторов или стержневых реакторов.

Решение двумерного уравнения поля токов в пластине в общем виде. В рассматриваемых элементах конструкции трансформаторов (и реакторов) распределение поля поперек пластин чаще всего четно симметрично относительно продольной оси $y=0$ (рис. 1) и произвольно вдоль оси x . В большинстве случаев можно принять $B_z(x, y) = B_m f(x) \varphi(y)$ (B_m — наибольшая амплитуда индукции). Таким образом запишем уравнение (3а) в виде:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} = C_1 f(x) \varphi(y), \quad (4)$$

где

$$C_1 = \frac{j\omega B_m}{\sqrt{2\rho}}. \quad (5)$$

Индекс z здесь и ниже опущен; берутся действительные значения F и σ .

¹ Изложенная постановка задачи предложена автору С. И. Лурье.

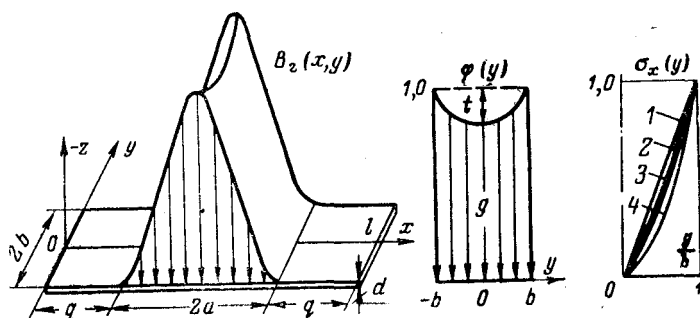


Рис. 1. Тонкая пластина и распределение нормальной к ней индукции $B_z(x, y)$.

$\sigma_x(y)$ — распределение плотности тока по поперечной оси контуров тока в пластине:

1 — теоретическое; 2 — в листе холоднокатаной стали, $b=100$ мм; 3 — в немагнитной пластине, $b=150$ мм; 4 — в листе холоднокатаной стали, $b=200$ мм. Вид функции $\varphi(y) = g + t \left(\frac{y}{b} \right)^2$.

Решение уравнения (4) удобнее всего искать в виде ряда по $\cos \frac{k\pi y}{2b}$, причем для выполнения условия $F(x, \pm b) = 0$ нужно брать только нечетные номера членов: $k = 2n + 1$, $n = 0, 1, 2$.

После необходимых преобразований найдем:

$$\begin{aligned} F(x, y) &= C_1 b \sum_{k=1, 3, 5, \dots} \frac{2\eta_k}{\pi k} \cos \eta_k y \times \\ &\times \left\{ \int_0^x f(\xi) \text{sh } \eta_k (x - \xi) d\xi - \right. \\ &\left. - \frac{\text{sh } \eta_k x}{\text{sh } \eta_k l} \int_0^l f(x) \text{sh } \eta_k (l - x) dx \right\}, \quad (6) \end{aligned}$$

где $\eta_k = \frac{k\pi}{2b}$;

η_k — коэффициенты разложения $\varphi(y)$ в ряд Фурье;

если $\varphi(y) = g + t \left(\frac{y}{b} \right)^2$ (рис. 1), то

$$\eta_k = \frac{4(-1)^n}{k\pi} \left(1 - \frac{8t}{k^2\pi^2} \right), \quad (7)$$

если $t=0$, то

$$\eta_k = \frac{4(-1)^n}{k\pi}.$$

Опыт показывает, что обратным влиянием магнитного поля вихревых токов на вызвавшее их поле и вытеснением токов в рассматриваемых пластинах можно пренебречь. При этом необходимо принять, что индукция во всех точках пластины имеет одинаковую фазу (токи отстают от индукции на 90°). Благодаря этому можно рассматривать только вещественную часть уравнения (4), решение которого будет состоять из вещественных функций. Это допущение позволяет рассматривать сложные случаи распределения индукции, значительно упростить расчетные формулы, сократить трудоемкость расчетов, сохраняя (как видно из экспериментальной части) достаточную для практики точность.

По формуле (2а) определим составляющие плотности тока, которую удобно выражать в виде

$$\sigma(x, y) = \sigma_0 k_\sigma(x, y), \quad (8)$$

где

$$\sigma_0 = \frac{\omega}{\sqrt{2\rho}} \int_0^b B_z(y) dy = \frac{\omega B_{м.ус} b}{\sqrt{2\rho}} = Cb$$

наибольшее действующее значение плотности тока на краях бесконечно длинной тонкой пластины при равномерном распределении индукции, равной $B_{м.ус}$ [Л. 1] (символ j здесь и ниже опущен); $k_\sigma(x, y)$ — относительная плотность тока в точке (x, y) тонкой пластины конечных размеров при заданном распределении индукции $B_z(x, y)$ с тем же значением $B_{м.ус}$ — наибольшей по оси x усредненной по ширине пластины амплитуды нормальной индукции;

$$C = C_1 B_{м.ус} / B_{м.} \quad (9)$$

В рассматриваемых трансформаторных пластинах $B_z(y)$ изменяется мало (рис. 1): $B_{м.ус} \approx (0,9-0,85) B_{м.}$ [Л. 1]. Поэтому удобно принять,

что $B_z(y) = \text{const} = B_{м.ус}$, т. е. $\varphi(y) = 1$. Тогда для расчетов достаточно знать только одну эпюру распределения индукции $B_z(x)$ вдоль пластины сердечника.

Результаты расчета относительной максимальной плотности тока (или коэффициента k_σ) как с использованием полной формулы (7) (т. е. при $t \neq 0$), так и по усредненному значению индукции $B_{м.ус}$ (т. е. при $t = 0$) практически одинаковы при $t < (0,3-0,4)$.

Решение для симметричных случаев и их анализ. Симметричным положением пластины относительно поля назовем такое, когда продольная и поперечная оси контуров вихревых токов на пластине являются осями симметрии. В табл. 1 даны полученные из (6), (2а) и (8) формулы для расчета k_σ , а на рис. 2 построены кривые $k_\sigma(\beta)$ для некоторых симметричных эпюр распределения $B_z(x)$ (номера кривых соответствуют номерам эпюр). Если характеризовать трапецидальную кривую параметрами $\beta = b/(a_0 + a_1)$ и $\alpha = a_0/(a_0 + a_1)$, то все значения $k_\sigma(\beta)$ для трапеций на рис. 2 располагаются между кривыми 1 ($\alpha = 1$) и 5 ($\alpha = 0$).

Таблица 1

Формула для расчета $k_\sigma = \sigma_{зм}/\sigma_0$

Номер эпюры	Эпюра $B_z(x)$	$q = 0 \quad (\lambda = 0)$	$\lambda \rightarrow \infty$
1		$1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{k=1, 3, 5, \dots} \frac{1}{k^2 \operatorname{ch} \frac{k\pi}{2\beta_0}}$	$1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{k=1, 3, 5, \dots} \frac{e^{-\frac{k\pi}{2\beta_0}}}{k^2}$
2		$1 - \frac{16\beta_1}{\pi^2} \sum_{k=1, 3, 5, \dots} \times \frac{1 - e^{-\frac{k\pi}{2\beta_1}}}{k^3 \left[e^{-\frac{k\pi}{2\beta_0}} + e^{-\frac{k\pi}{2\beta_0} (2 + \beta_1/\beta_0)} \right]}$	$1 - \frac{16\beta_1}{\pi^2} \sum_{k=1, 3, 5, \dots} \frac{e^{-\frac{k\pi}{2\beta_0}}}{k^3} \left(1 - e^{-\frac{k\pi}{2\beta_1}} \right)$
3		$\frac{\operatorname{th} 0,5\pi\beta}{0,5\pi\beta}$	$\frac{\operatorname{th} 0,5\pi\beta}{0,5\pi\beta} + \frac{8\beta}{\pi^2} \sum_{k=1, 3, 5, \dots} \frac{e^{-\frac{k\pi}{2\beta}}}{k^3 \left(1 + \frac{\beta^2}{k^2} \right)}$
4		$\frac{1}{2} + \frac{\operatorname{th} \pi\beta}{2\pi\beta} + \frac{16\beta^2}{\pi^2} \sum_{k=1, 3, 5, \dots} \times \frac{1}{k^4 \left(1 + 4 \frac{\beta^2}{k^2} \right) \operatorname{ch} \frac{k\pi}{2\beta}}$	$\frac{1}{2} + \frac{\operatorname{th} \pi\beta}{2\pi\beta} - \frac{16\beta^2}{\pi^2} \sum_{k=1, 3, 5, \dots} \frac{e^{-\frac{k\pi}{2\beta}}}{k^4 \left(1 + 4\beta^2/k^2 \right)}$
5		$1 - \frac{16\beta}{\pi^2} \sum_{k=1, 3, 5, \dots} \frac{\operatorname{th} \frac{k\pi}{2\beta_1}}{k^3}$	$1 - \frac{16\beta}{\pi^2} \sum_{k=1, 3, 5, \dots} \frac{1 - e^{-\frac{k\pi}{2\beta}}}{k^3}$

Примечания: 1. Обозначено $\beta_1 = b/a_1$, $\beta_0 = b/a_0$, $\lambda = q/b$.

2. При $q \leq x \leq q + 2a$ эпюра 3: $B_z = \sin \frac{\pi}{2a} (x - q)$; эпюра 4: $B_z = \sin^2 \frac{\pi}{2a} (x - q)$.

Из анализа полученных формул вытекают некоторые практические рекомендации:

1. Если относительная длина выступающих за пределы поля концов пластины $\lambda > (1,5 \div 2)$, то расчеты σ_m можно вести как при $\lambda \rightarrow \infty$. В этом случае в широких ($\beta > 0,4$) пластинах σ_m несколько больше, чем при $\lambda = 0$ (рис. 2).

2. Если отношение длины участка с равномерно распределенным полем к ширине пластины $\alpha_0 = a_0/b > 2,4$, то $k_\sigma = 1$, т. е. $\sigma_m = \sigma_0$.

3. На величину k_σ существенно влияет форма верхней части эпюры $B_z(x)$, степень ее трапецидальности.

4. В пластинах, когда с обеих сторон $q \neq 0$ максимальная плотность тока находится на боковых краях пластины в зоне максимума кривой индукции.

5. Сложную кривую $B_z(x)$ можно представить суммой простых составляющих и определять плотность тока, алгебраически складывая ее составляющие от каждого поля. Этот прием особенно удобен на краях пластины и осях контуров токов, где есть только одна составляющая тока.

По выражению (6) рассчитана также плотность тока для некоторых несимметричных случаев, в частности для пластины, меньшая сторона которой находится в зоне максимальной индукции при «треугольном» распределении $B_z(x)$ и др.

Численное решение двумерного уравнения поля токов (4). Эта работа была выполнена в ВЭИ на ЭЦВМ «Минск-22» сеточным методом² [Л. 3]. При $C = 1$ а/см³ ЭЦВМ печатает значения F в узлах сетки, производные $\partial F/\partial x$, $\partial F/\partial y$, равные $k_{\sigma x}(x, y)$, $k_{\sigma y}(x, y)$, а также сумму квадратов $[k_{\sigma x}^2(x, y) + k_{\sigma y}^2(x, y)]$, пропорциональную потерям (см. ниже). Рисунки 3 и 5, построенные по расчетам на ЭЦВМ, иллюстрируют влияние размеров пластин и формы эпюры $B_z(x)$ на распределение и величину относительной плотности токов вдоль края $k_{\sigma x}(x, b)$ и по продольной оси пластин $k_{\sigma y}(x, 0)$.

Из рис. 3, в видно, что положение поперечной оси контуров токов в пластине, расположенной несимметрично относительно эпюры индукции $B_z(x)$, зависит от значения β . Поэтому высказанное в [Л. 1] предположение о поперечной оси как линии, делящей пополам поток, входящий в пластину, следует считать лишь грубо ориентировочным.

Решение для одномерных случаев. Иногда распределение токов в пластине можно рассматривать как одномерное. Тогда уравнение (4) становится обыкновенным дифференциальным и если распределение $B_z(x) = B_{m.yc} f(x)$, то можно получить:

$$\begin{aligned} \sigma_y(x) &= C \int f(x) dx - \frac{C}{x_1 - x_0} \int_{x_0}^{x_1} \int f(x) dx^2 = \\ &= \frac{\omega}{V^{2\rho}} \left[\Phi(x) - \frac{1}{x_1 - x_0} \int_{x_0}^{x_1} \Phi(x) dx \right], \quad (10) \end{aligned}$$

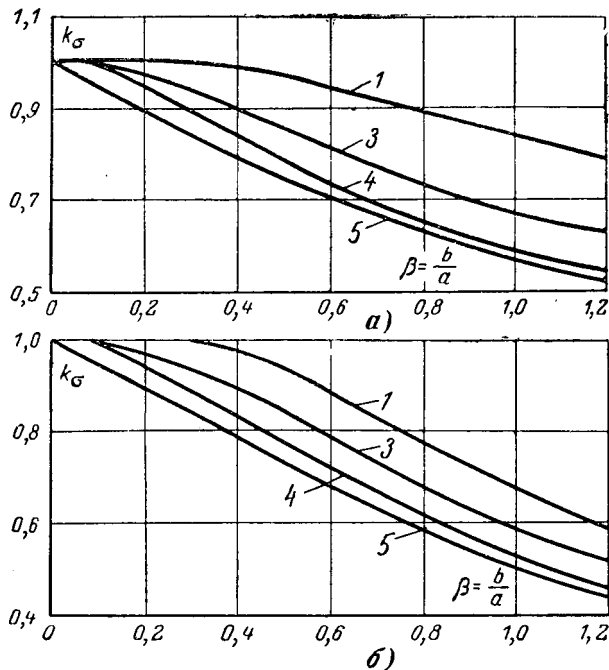


Рис. 2. Значения относительной наибольшей плотности тока $k_\sigma(\beta)$ для некоторых симметричных случаев. а — $q/b \rightarrow \infty$; б — $q/b = 0$. Распределение $B_z(x)$ в форме: 1 — «прямоугольника»; 2 — «полусинусоиды»; 3 — $B_z = \sin^2 \frac{\pi}{2a} (x-q)$; 4 — «треугольника» (табл. 1).

где Φ — амплитуда потока на единицу размера пластины по оси y ; x_0, x_1 — значение x на левой и правой границах пластины.

Найдем, например, распределение плотности токов по ширине вставки стержневого реактора (размер $b \gg a$). Нормальная составляющая индукции от потока «выпучивания» из зазора $B_z(x) = C \left(\frac{x}{a}\right)^3$ (приближенно). По формуле (10)

$$\sigma_y(x) = \frac{Ca}{4} \left[\left(\frac{x}{a}\right)^4 - \frac{1}{5} \right],$$

где C — по (9).

Кривая $\sigma_y(x)$ показана на рис. 4.

Максимальные удельные (на единицу объема) потери в стержне трансформатора в соответствии с изложенным

$$p_m = \rho_t (\sigma_0 k_\sigma)^2 = \rho_t^{-1} (4,44 f B_{m.yc} b k_\sigma)^2. \quad (11)$$

Для расчетов при 50 гц, $\rho_{75} = 0,54 \cdot 10^{-6}$ ом·м (холоднокатаная сталь) и, как правило, $B_{m.yc} \approx 0,9 B_m$, удобнее пользоваться формулой (12), с размерностями тл и см

$$p_m = 7,3 (B_m b k_\sigma)^2 [\text{вт/см}^3]. \quad (12)$$

При других значениях ρ_t коэффициент 7,3 необходимо соответственно заменить, например, на 5,7 при $\rho_{75} = 0,7 \cdot 10^{-6}$ ом·м (немагнитная марки 1X18H9T и горячекатаная сталь).

² Программа для ЭЦВМ разработана А. М. Поволоцким и Л. Б. Серковой.

Таким образом, формула, данная в [Л. 1], уточняется введением коэффициента k_σ^2 , который близок к 1 только для относительно узких пластин или при $a_0/b > 2,4$. Определение значений $k_\sigma(\beta)$ указано выше.

Параметры кривой $B_z(x)$ на четвертой эюре в табл. 1, наиболее соответствующей обычному «треугольному» распределению $B_z(x)$ у поверхности стержня трансформатора около торцов обмотки, равны: $a=1,2 a'$, $\beta=b/a$. Отрезок a' (см. рис. 5)

отсекается на оси абсцисс прямой, почти совпадающей с верхней частью действительной кривой $B_z(x)$, где $B_z > 0,5 B_M$.

Зависимость $k_\sigma(\beta)$ при $\lambda \rightarrow \infty$ (кривая 4 на рис. 2) аппроксимируется:

$$k_\sigma = (1 + 1,15\beta^2)^{-1} \text{ при } 0 < \beta < 0,5, \quad (13)$$

$$k_\sigma = 0,15 [2,97 + (2 - \beta)^2] \text{ при } 0,5 < \beta < 1,2. \quad (13a)$$

Потери в пакете стержня и в стяжной пластине трансформатора. Использование ЭЦВМ позволило

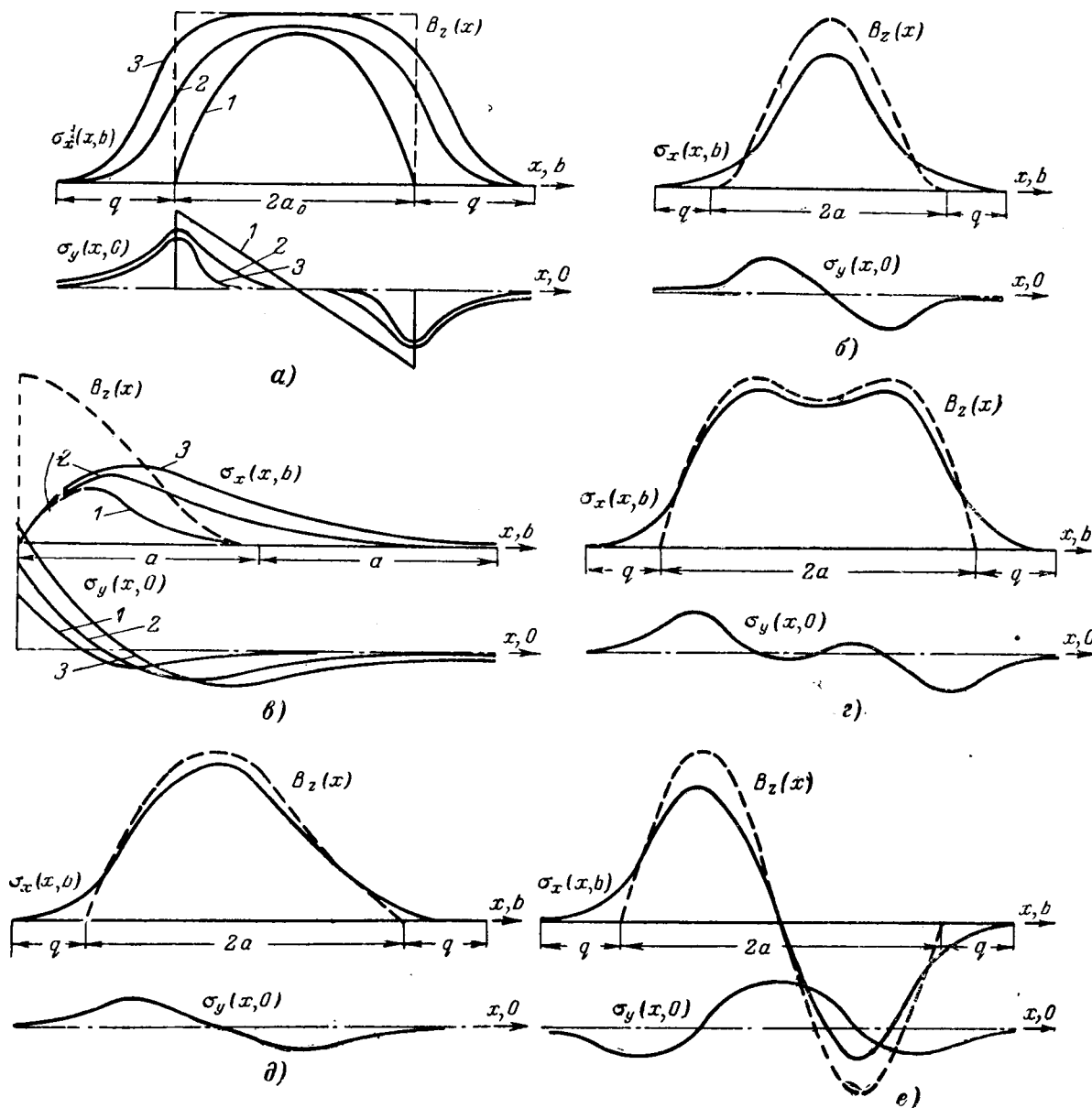


Рис. 3. Полученное на ЭЦВМ распределение относительной плотности токов вдоль края пластины (x, b) и по оси $y=0$ в зависимости от формы эиоры $B_z(x)$ и размеров пластины.

$a-l$ — при $\beta=0,5$, $\lambda=0$; 2 — при $\beta=0,5$, $\lambda=2$; 3 — при $\beta=0,25$, $\lambda=2$;

$b-B_z(x) = \sin^2 \frac{\pi}{2a}(x-q)$ при $q < x < q+2a$ («сглаженный треугольник»), $\beta=0,48$, $\lambda=1,0$;

$в-B_z(x) = \cos^2 \frac{\pi x}{2a}$ при $0 < x < a$; $a = \text{const}$, $\sigma_0 = Ca$, $\sigma_M \approx \beta k_\sigma \sigma_0$; 1 — $\beta=0,25$; 2 — $\beta=0,5$; 3 — $\beta=1,0$. В случае $в M_\sigma = 2,5:1$.

$г-B_z(x) = 1,17 \left[\sin \frac{3\pi}{2a}(x-q) + 0,25 \sin \frac{3\pi}{2a}(x-q) \right]$ при $q < x < q+2a$; $\beta=0,25$, $\lambda=2$; $д-B_z(x) = 0,91 \left[\sin \frac{\pi}{2a}(x-q) + 0,25 \sin \frac{\pi}{a}(x-q) \right]$ при $q < x < q+2a$; $\beta=0,25$, $\lambda=2$; $е-B_z(x) = \sin \frac{\pi}{a}(x-q)$ при $q < x < q+2a$; $\beta=0,25$, $\lambda=2$.

не только проверить точность данной в [Л. 1] формулы расчета потерь в стержне при треугольном распределении $B_z(x)$, но и определять потери при любой эпюре индукции. Уточнение формул [Л. 1] требуется только при $\beta > 0,3 \div 0,4$. Потери в одном «очаге» (площадью $S=4ab$) пакета или пластины при обычном вдоль стержня распределении $B_z(x)$ в форме «сглаженного треугольника» (рис. 3,б) определяются следующими формулами:

$$P_{\Delta} = 0,549\rho_t^{-1} f^2 B_{m,yc}^2 \delta (a_1 + a_2) b_0^3 k_b k_K k_{CT}, \quad (14)$$

или

$$P_{\Delta} = 2,2\rho_t^{-1} f^2 \Phi_m^2 \delta \beta k_b k_K k_{CT}. \quad (15)$$

При 50 гц $\rho_{75} = 0,54 \cdot 10^{-6}$ ом·м (холоднокатаная сталь) и при $B_{m,yc} \approx 0,9B_m$ удобнее пользоваться формулами с размерностями: тл, в·сек, см:

$$P_{\Delta} = 0,2B_m^2 (a_1 + a_2) b_0^3 \delta k_b k_K k_{CT} [\text{вт}], \quad (14a)$$

или

$$P_{\Delta} = \Phi_m^2 \delta \beta k_b k_K k_{CT} [\text{вт}]. \quad (15a)$$

Здесь:

Φ_m — амплитуда потока рассеяния, проходящего через «очаг потерь», $b_0 = 2b$, $(a_1 + a_2) = 2a$; в случае неравностороннего треугольника $\beta = 2b/(a_1 + a_2)$;

δ — эквивалентная толщина слоя потерь в пакете; опытные зависимости [Л. 1] аппроксимируются формулами (размерности тл, см):

холоднокатаная сталь

$$\delta_{ХК} = 0,14 + 10B_m(0,69 - 0,01b_0) [\text{см}], \quad (16)$$

горячекатаная сталь

$$\delta_{ГК} = 0,15 + 10B_m(0,89 - 0,01b_0) [\text{см}]; \quad (16a)$$

k_b — коэффициент, учитывающий эффект вытеснения вихревого тока к краям пластины [Л. 1]. Аппроксимируется формулами:

холоднокатаная и немагнитная сталь

$$k_b = 0,8 + 0,19(1 - 0,02b_0)^2, \quad (17)$$

горячекатаная сталь

$$k_b = 0,48 + 0,5(1 - 0,02b_0)^2; \quad (17a)$$

k_K — коэффициент, корректирующий результаты расчета на основе приближенной диаграммы распределения токов [Л. 1] с результатами на ЭЦВМ:

$$k_K = 1 \text{ при } \beta < 0,3, \quad (18)$$

$$k_K = (1,15 - 0,5\beta) \text{ при } 0,3 < \beta < 1; \quad (18a)$$

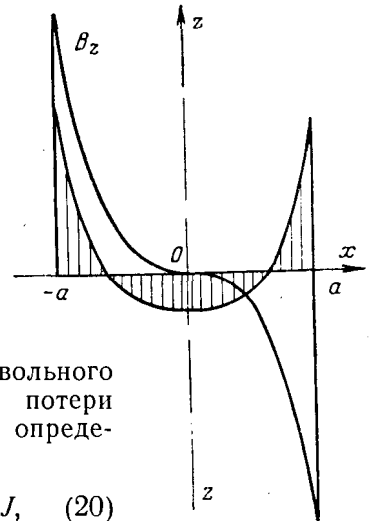
k_{CT} — коэффициент стыка, отношение вычисленных на ЭЦВМ потерь в разрезанных (поперек — в зоне максимальной индукции) и в неразрезанной пластинах при одинаковых значениях B_m , a , β и предположении, что и k_b и δ у них одинаковы:

$$k_{CT} = 0,3(0,26 + \beta)^{-1} \text{ при } 0,1 < \beta < 1, \quad (19)$$

$k_{CT} = 1$ — для стяжной пластины и листов пакета, не имеющих стыков в зоне максимума индукции.

В практических случаях (β от 0,2 до 0,5) поперечный разрез может уменьшить потери в 1,5—2,5 раза, а максимальные местные — примерно в 3,2 раза.

Рис. 4. Распределение нормальной составляющей $B_z(x)$ и плотности тока по ширине пластины вставки стержневого реактора.



В случае произвольного распределения $B_z(x)$ потери в одном очаге потерь определяются по формуле

$$P = 4,44^2 \rho_t^{-1} f^2 B_{m,yc}^2 \delta k_b b^4 J, \quad (20)$$

или при 50 гц, $\rho_{75} = 0,54 \cdot 10^{-6}$ ом·м, $B_{m,yc} \approx 0,9B_m$ и размерностях тл, см:

$$P = 0,46B_m^2 \delta b_0^4 k_b J [\text{вт}], \quad (20a)$$

где $J = \int k_x(x, y) ds$ — коэффициент, пропорциональный потерям в тонкой пластине единичной толщины, при $b=1$, заданном отношении размеров $(a+q)/b$ и форме кривой $B_z(x)$.

Зависимости значений $J(\beta)$ для некоторых простых форм эпюр $B_z(x)$ (при $q/b > 2$) подсчитаны на ЭЦВМ и аппроксимированы формулами.

При распределении $B_z(x)$ в форме: «сглаженного треугольника»

$$J_{\Delta} = 0,445\beta^{-1} k_K,$$

где k_K — по формулам (18) и (18a); прямоугольника

$$J_{\square} = 0,97(\beta_0 - 0,05)^{-1} \text{ при } \beta_0 = \frac{b}{a_0} < 0,6, \quad (22)$$

$$J_{\square} = 0,7(\beta_0 - 0,2)^{-1} \text{ при } 0,6 < \beta_0 < 1,2; \quad (22a)$$

трапеции

$$J_{\square} = 0,92(J_{\Delta} + 1,335\beta_0^{-1}).$$

Формула (23) примерно в 4 раза снижает значение результата (на 40% при относительно широких пластинах), даваемого формулой (6) из [Л. 1].

Эксперименты и расчеты. Измерение распределения $B_z(x, y)$ значений $B_{m,yc}$ и $E = \rho\sigma$ проведено на модели и трансформаторах при их испытаниях на Московском электрозаводе. Основные методы измерений и модель те же, что описанные в [Л. 1]. На модели (последовательно) были созданы трапециевидное и два треугольных распределения $B_z(x)$. Плотность тока на обеих поверхностях 10 мм немагнитной пластины — одинакова. Эффект вытеснения токов к краям — слабый (рис. 1— $\sigma_x(y)$). Расчетное распределение плотности токов соответствует измеренному. Для опытного определения коэффициента k_b измерялась наибольшая э. д. с., наводи-

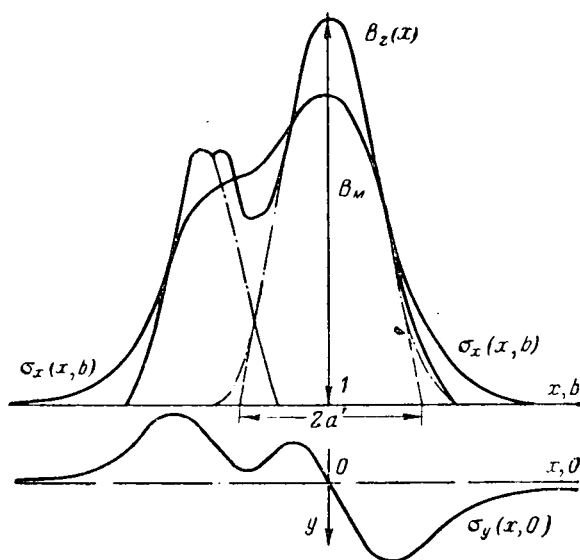


Рис. 5. Распределение $B_z(x)$ в трансформаторе типа ТДТНГУ-40500/110, снятое при испытаниях, и распределение плотностей вихревых токов в первом листе крайнего пакета, полученное на ЭЦВМ.

мая в узком витке, размером $3 \times b$ см² и наибольшее напряжение вихревого тока на краю листа между точками на расстоянии 3 см. Отношение измеренного напряжения к э. д. с. дает измеренное значение k_e . Результаты измерений и расчетов k_e отличаются меньше, чем на 6,6—8%. Основные результаты расчетов и измерений удельных потерь на двух трансформаторах типа ТДТНГУ-40500/110 (Т-1 и Т-2) приведены в табл. 2. Эюра $B_z(x)$ около стержня Т-1 приведена на рис. 5. Распределение $B_z(x)$ у Т-2 почти такое же, но с меньшим значением B_m (вследствие различия в конструкции обмотки). В Т-1 и Т-2 термометрическим методом измерены удельные потери. Кроме того, в Т-1 измерена наибольшая напряженность вихревых токов в листе $E_{взм} = 13,75$ мВ/см. Следовательно, при $\rho_{75} = 0,55 \cdot 10^{-4}$ ом·см и удельном весе $7,65 \cdot 10^{-3}$ кг/см³ $p_m = 440$ Вт/кг. Измерения проводились при токах $0,75I_n$ (Т-1) и $0,626I_n$ (Т-2) — в баках без масла. В табл. 2 указаны результаты, приведенные (квадратично) к номинальному току и к краю листа пакета.

Сравним эти данные с расчетными. Выделяем из кривой $B_z(x)$ на рис. 5 «сглаженный треугольник» (штрих-пунктир). Вершина меньшего треугольника

(в зоне стального прессующего кольца) расположена достаточно далеко от точки 1 и поэтому эта составляющая поля на плотность тока в точке 1 практически не влияет. Для основного треугольника: $\beta = 0,47$; по кривой 4 на рис. 2, $a k_e = 0,8$. Расчет по формуле (12) дает:

$$p_m = 7,3 \cdot 10^{-8} (629 \cdot 13,5 \cdot 0,8)^2 = 3,38 \text{ Вт/см}^3$$

$$\text{или } 440 \text{ Вт/кг.}$$

Таблица 2

Результаты расчетов и измерений

Объект	Расчетные данные		Измеренные данные		
	$B_m, \text{ тл}$	$P_m, \text{ Вт/кг}$	$P_m(E), \text{ Вт/кг}$	$P_m(T), \text{ Вт/кг}$	$2b, \text{ мм}$
Т-1	$629 \cdot 10^{-4}$	440	440	400	270
Т-2	$515 \cdot 10^{-4}$	295	—	286	270

В данном случае результат полностью совпадает с измеренным электрически и на 10% больше определенного термометрическим методом.

Выводы. 1. Предлагаемая методика расчета вихревых токов и потерь в крайних пластинах стержня трансформатора, пронизываемых нормальной составляющей потока рассеяния, дает значительно лучшее приближение к действительности, чем существующая методика [Л. 1] для случая «треугольного поля» и позволяет вести расчеты во всех случаях распределения индукции у стержня трансформатора или реактора, которые встречаются на практике.

2. Уточнены формулы для расчета добавочных потерь, данные в [Л. 1]. Необходимые для расчетов опытные кривые аппроксимированы простыми формулами.

3. Погрешность расчетов максимальных удельных потерь в стержнях трансформаторов по уточненной методике меньше 10% и, в основном, определяется точностью расчетов поля или измерений поля и удельных потерь.

Литература

1. Манькин Э. А., Морозов Д. Н. и Алферова А. В., Добавочные потери в стержнях мощных трансформаторов в опыте короткого замыкания, «Электричество», 1964, № 12.
2. Смайт В., Электростатика и электродинамика, Изд-во иностранной литературы, 1954.
3. Коган Б. М. и Тер-Микаэлян Т. М., Решение инженерных задач на цифровых вычислительных машинах, изд-во «Энергия», 1964.

[10.6.1967]



Метод расчета токовой и угловой погрешностей трансформатора тока при глубоком насыщении сердечника

Инж. К. С. ДМИТРИЕВ, канд. техн. наук В. Е. КАЗАНСКИЙ

Москва

Инж. Е. П. КОРОЛЕВ и Э. М. ЛИБЕРЗОН

Горький

Введение. При анализе работы релейной защиты нередко приходится оценивать погрешности трансформатора тока при глубоком насыщении его сердечника.

Если стальной сердечник трансформатора тока выполнен без немагнитного зазора, то при синусоидальном первичном токе возможно искажение формы кривой вторичного тока, тем более значительное, чем больше амплитуда индукции в сердечнике. Особенно большое искажение возможно при чисто активном сопротивлении вторичной нагрузки трансформатора тока и при большой токовой погрешности. Приведенные на рис. 1 осциллограммы получены при испытании трансформатора тока типа ТВ-35 при чисто активной нагрузке и токовой погрешности — 48%, что для релейной защиты в ряде случаев считается допустимым. При практически синусоидальном первичном токе вторичный ток оказывается весьма значительно искаженным, в основном за счет третьей и пятой гармоник.

Общепринятые в настоящее время методы расчета погрешностей трансформаторов тока в схемах релейной защиты, основанные на замене искаженного вторичного тока эквивалентным ему по действующему значению синусоидальным током, не позволяют учитывать в полной мере искажение формы кривой вторичного тока. Такие методы, называемые иногда методами эквивалентных синусоид, дают вполне приемлемые для практики результаты расчета токовой и угловой погрешностей только при незначительном искажении формы кривой вторичного тока. Если расчетная токовая погрешность не превышает 10%, то практически всегда вторичный ток мало искажен, и методы эквивалентных синусоид дают приемлемые для практики результаты, правда, при условии, что учитывается не только модуль, но и фазовый угол сопротивления вторичной нагрузки¹.

Если форма кривой вторичного тока значительно искажена, то методы эквивалентных синусоид дают завышенные значения токовой погрешности, что в ряде случаев приводит к завышению сечения контрольных кабелей и неоправданному увеличению их стоимости. Поэтому разработка достаточно простых, но более точных методов расчета погрешностей трансформатора тока в условиях глубокого насыщения сердечника в настоящее время представляет интерес.

Выполненные авторами исследования² показали, что при глубоком насыщении сердечника и боль-

шой токовой погрешности более близко совпадающие с опытом результаты дают методы расчета погрешностей, основанные на замене реальной характеристики намагничивания сердечника трансформатора тока прямоугольной безгистерезисной характеристикой (ПХН). Принципиальная возможность такой замены отмечается в [Л. 2 и 3].

У трансформатора тока с ПХН потокосцепление может изменяться только в конечных пределах: $\pm \Psi_s$. Во время изменения потокосцепления в этих пределах ток намагничивания равен нулю, и сопротивление ветви намагничивания равно бесконечности. В момент, когда сердечник насыщается и изменение потокосцепления прекращается, сопротивление ветви намагничивания скачком снижается до нуля. Ветвь намагничивания в схеме замещения такого трансформатора тока может быть заменена рубильником, замкнутым при насыщенном сердечнике и разомкнутым при ненасыщенном сердечнике.

В большинстве случаев практики вторичная нагрузка трансформатора тока замещается последовательной цепочкой $L_{\text{н}}, r_{\text{н}}$. При этом схема замещения трансформатора тока с ПХН может быть изображена в соответствии с рис. 2.

Графики мгновенных значений токов и напряжения в схеме замещения трансформатора тока с ПХН приведены на рис. 3. Участки А этих графиков соответствуют отрезкам времени, когда сердечник ненасыщен, и рубильник в ветви намагничивания разомкнут. В это время ток намагничивания равен:

$$i_0 = 0;$$

вторичный ток равен приведенному первичному:

$$i_2 = i_1 = I'_{1m} \sin \omega t; \quad (1)$$

э. д. с. трансформатора:

$$e_0 = I'_{1m} z_2 \sin(\omega t + \varphi_2),$$

где $I'_{1m} = I_{1m} \frac{\omega_1}{\omega_2}$ — амплитуда приведенного первичного тока;

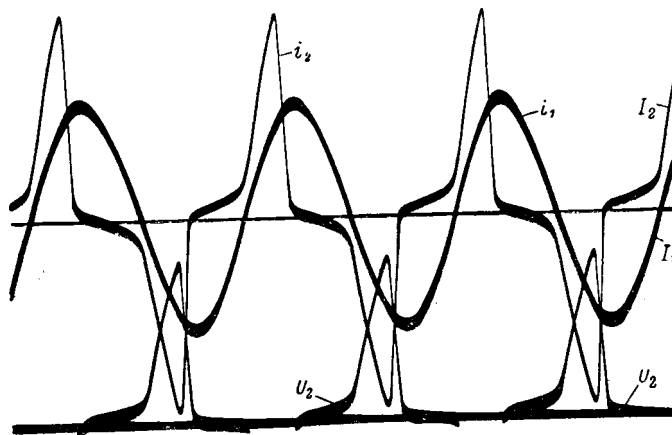


Рис. 1. Осциллограммы токов и напряжения трансформатора тока типа ТВ-35 при активной нагрузке, токовой погрешности 48% и угловой погрешности 45°.

¹ Расчетная токовая погрешность определяется в предположении, что номинальный коэффициент трансформации трансформатора тока численно равен отношению чисел витков вторичной и первичной обмоток трансформатора тока [Л. 1].

² Исследования в лабораторных условиях производились в лабораториях ОРГРЭС (Москва) и Энергосетьпроект (Горький). Испытания в реальных условиях производились на одной из ГЭС совместно Горэнерго, Энергосетьпроект, ЧЭТНИИ и ОРГРЭС.

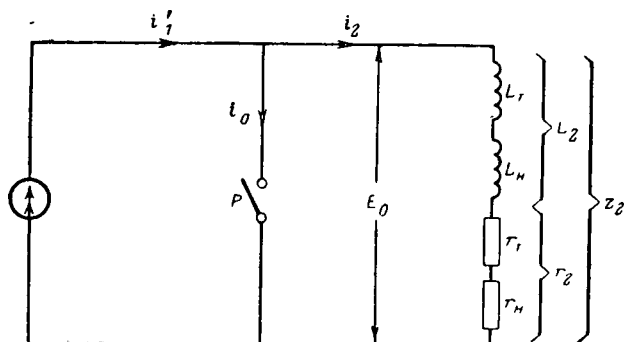


Рис. 2. Схема замещения трансформатора тока с прямоугольной характеристикой намагничивания при смешанной активно-индуктивной нагрузке.

L_T и r_T — индуктивность рассеяния и активное сопротивление вторичной обмотки, $r_2 = r_T + r_H$ и $L_2 = L_T + L_H$ — суммарные значения активного сопротивления и индуктивности ветви вторичного тока.

ω_1 и ω_2 — числа витков первичной и вторичной обмоток;

$$z_2 = \sqrt{r_2^2 + (\omega L_2)^2};$$

$$\tan \varphi_2 = \frac{\omega L_2}{r_2}.$$

Участки *Б* соответствуют отрезкам времени, когда сердечник насыщен и рубильник в ветви намагничивания замкнут. Замыкание рубильника происходит в момент ωt_1 . При этом начинается затухание вторичного тока по экспоненциальному закону с постоянной времени вторичной цепи:

$$T_2 = \frac{L_2}{r_2},$$

и появляется ток намагничивания:

$$i_0 = i_1' - i_2. \quad (2)$$

Ток намагничивания вначале возрастает, затем снижается.

В момент ωt_2 он снижается до нуля, рубильник размыкается, начинается новый участок *А* и перемагничивание сердечника в обратном направлении.

Определение токовой погрешности. При синусоидальном первичном токе расчетная токовая погрешность:

$$f_i = \left(\frac{I_2}{I_1'} - 1 \right) 100\%, \quad (3)$$

где I_2 — действующее значение вторичного тока;

$I_1' = I_1 \frac{\omega_1}{\omega_2}$ — действующее значение приведенного первичного тока.

Вторичный ток можно выразить следующим образом:

$$I_2 = f \left(I_1; T_2; \Psi_s; z_2; \frac{\omega_1}{\omega_2} \right). \quad (4)$$

При этом токовая погрешность:

$$f_i = f(\omega t_1; \omega t_2). \quad (5)$$

Численные значения углов ωt_1 и ωt_2 можно определить исходя из постоянства площади импульса э. д. с. ветви намагничивания $e_0[t]$ в течение каждого полупериода (эти площади на рис. 3 заштрихованы).

При чисто активной нагрузке трансформатора тока практически можно считать, что $L_2 = 0$; $T_2 = 0$. Тогда

$$\omega t_2 \equiv \pi, \quad \sin \omega t_2 = 0.$$

При этом, согласно [Л. 2]:

$$\cos \omega t_1 = 1 - 2 \frac{\omega \Psi_s}{r_2 I_{1m}}, \quad (6)$$

$$I_2 = \frac{I_{1m}}{2 \sqrt{\pi}} \sqrt{2 \omega t_1 - \sin 2 \omega t_1}.$$

Отсюда токовая погрешность при чисто активной нагрузке:

$$f_i = \left(\sqrt{\frac{2 \omega t_1 - \sin 2 \omega t_1}{2 \pi}} - 1 \right) 100\%. \quad (7)$$

В данном случае она зависит только от ωt_1 .

Максимальное потокоцепление:

$$\Psi_s = B_s S \omega_2, \quad (8)$$

где B_s — индукция насыщения сердечника, тл;

S — площадь поперечного сечения стальной части сердечника, м²;

ω_2 — число витков вторичной обмотки.

Для удобства инженерных расчетов целесообразно ввести обобщенный коэффициент C , подсчитываемый по следующей формуле:

$$C = \frac{222 B_s S \omega_2^2}{z_2 I_1 \omega_1}, \quad (9)$$

где I_1 — действующее значение первичного тока, при котором рассчитывается погрешность;

z_2 — полное сопротивление для синусоидального тока ветви вторичного тока в схеме замещения.

При чисто активной нагрузке $z_2 = r_2$.

С учетом формулы (9) угол ωt_1 можно представить как функцию обобщенного коэффициента

$$\cos \omega t_1 = 1 - 2C. \quad (10)$$

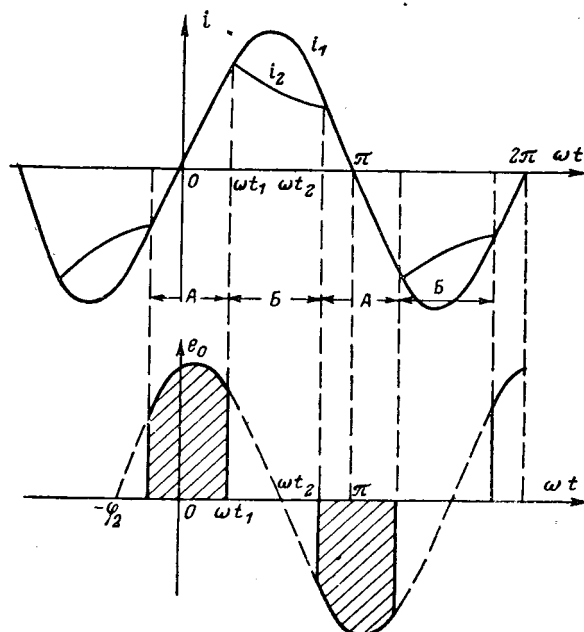


Рис. 3. Графики мгновенных значений токов и напряжения в схеме замещения рис. 2 при смешанной нагрузке.

Отсюда следует, что токовую погрешность при чисто активной нагрузке можно рассматривать как функцию только обобщенного коэффициента C .

На рис. 4 по формулам (10) и (7) построена характеристика зависимости токовой погрешности от обобщенного коэффициента C при чисто активной нагрузке (кривая 1).

При чисто индуктивной нагрузке трансформатора тока постоянная времени T_2 практически равна бесконечности. При этом, согласно [Л. 2]:

$$\sin \omega t_1 = \frac{\Psi_s}{L_2 I'_{1m}} = \sin \omega t_2. \quad (11)$$

Введя обобщенный коэффициент C , получим:

$$\sin \omega t_1 = \sin \omega t_2 = C. \quad (12)$$

Численное значение обобщенного коэффициента подсчитывается по той же формуле (9), но только $z_2 = \omega L_2 = x_2$.

Поскольку при чисто индуктивной нагрузке постоянная времени вторичной цепи равна бесконечности, то после замыкания рубильника в схеме замещения вторичный ток не затухает, и действующее значение вторичного тока за период будет равно:

$$I_2 = \frac{I'_{1m}}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{2\omega t_1 - \sin 2\omega t_1 + 2(\pi - 2\omega t_1) \sin^2 \omega t_1}. \quad (13)$$

Отсюда расчетная токовая погрешность:

$$f_i = 100 \left(-1 + \sqrt{\frac{2}{\pi} \times \times \sqrt{\omega t_1 - 0,5 \sin 2\omega t_1 + (\pi - 2\omega t_1) \sin^2 \omega t_1}} \right). \quad (14)$$

Таким образом, и при чисто индуктивной вторичной нагрузке токовая погрешность является функцией только угла ωt_1 и поэтому тоже может быть представлена как функция обобщенного коэффициента C (рис. 4, кривая 2).

Числитель выражения (9) равен умноженному на $(1,11\omega_2)$ среднему значению э. д. с. ветви намагничивания $E_0 = E_s$ в условиях, когда сердечник насыщен. Поэтому выражение (9) можно переписать следующим образом:

$$C = \frac{1,11 E_s}{z_2 I'_{1x}}. \quad (15)$$

Если известно E_s или B_s , S и ω_2 , то определение погрешности при заданных приведенном первичном токе и сопротивлении чисто активной или чисто индуктивной нагрузки производится следующим образом:

а) по формуле (9) или (15) рассчитывается обобщенный коэффициент C ,

б) по соответствующей кривой на рис. 4 находится искомая погрешность.

Если требуется определить предельно допустимое сопротивление вторичной нагрузки, при котором для заданного приведенного первичного тока погрешность не превысит заданного значения, то сначала по одной из кривых на рис. 4 находится значение обобщенного коэффициента C , соответствующего заданной погрешности.

Допустимое значение сопротивления чисто ак-

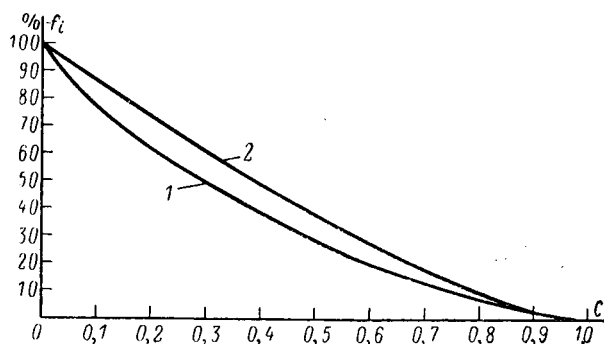


Рис. 4. Зависимость токовой погрешности от обобщенного коэффициента C при чисто активном (кривая 1) и чисто индуктивном (кривая 2) сопротивлении ветви вторичного тока.

тивной нагрузки определяется по следующей формуле:

$$R_{н. доп} \leq \frac{1,11 E_s}{C_1 I'_{1x}} - r_T, \quad (16a)$$

где C_1 — численное значение коэффициента C , соответствующее предельно допустимой токовой погрешности при чисто активной нагрузке (находится по кривой 1 на рис. 4);

r_T — активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора тока.

Допустимое значение сопротивления чисто индуктивной нагрузки определяется по формуле:

$$x_{н. доп} \leq \frac{1,11 E_s}{C_2 I'_{1x}} - x_T \text{ [ом]}, \quad (16b)$$

где C_2 — значение коэффициента C , соответствующее допустимой токовой погрешности при чисто индуктивной нагрузке (находится по кривой 2 на рис. 4);

x_T — индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки трансформатора тока.

Столь же просто определяется и предельный первичный ток, при котором для данного сопротивления чисто активной или чисто индуктивной нагрузки погрешность не превысит допустимого значения.

При этом автоматически учитывается искажение формы кривой вторичного тока и характер нагрузки (чисто активная или чисто индуктивная).

Определение B_s и E_s . При практическом использовании предлагаемой методики расчета погрешностей может возникнуть необходимость в определении численного значения B_s или E_s (мы считаем, что в принципе эти величины должны указываться заводами-изготовителями трансформаторов тока).

Если для данного трансформатора тока известно частное значение токовой погрешности f_{ix} , получающейся при частных значениях $I'_{1x} z_{2x}$, при чисто активной или индуктивной нагрузке, в условиях глубокого насыщения сердечника, то по кривым на рис. 4 находят частное значение обобщенного коэффициента $C = C_x$, после чего значения E_s и B_s могут быть вычислены по следующим формулам:

$$E_s = \frac{C_x z_{2x} I'_{1x}}{1,11}, \quad (17)$$

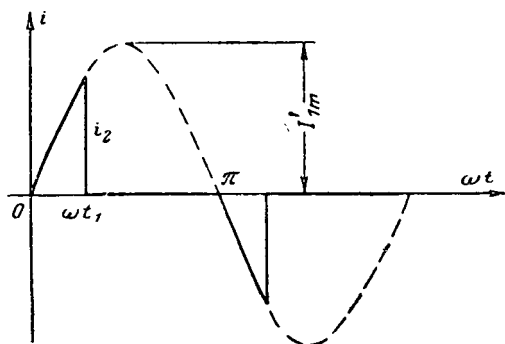


Рис. 5. Форма кривой вторичного тока трансформатора тока с ПХН при чисто активном сопротивлении ветви вторичного тока.

$$B_s = \frac{C_x z_{21} I'_{1x}}{222 S W_2}.$$

Для предотвращения промахов величины E_s и B_s лучше определять как средние арифметические ряда измеренных.

Величину B_s можно найти и по характеристике намагничивания стали, из которой изготовлен сердечник. Она приблизительно равна индукции, при которой пересекаются восходящая и нисходящая ветви предельной динамической петли реального трансформатора тока. По данным [Л. 4 и 5] для сталей марок Э-41 и Э-42 $B_s = 1,3—1,4$ тл, а для стали Э-310 до Э-330 она лежит в пределах 1,6—1,7 тл. Меньшие значения индукции насыщения следует принимать для трансформатора тока со штампованным сердечником, большие для трансформатора тока с ленточным сердечником. Неточность определения величин B_s и E_s в 10% соответствует при $\varphi_2 = 0$ абсолютной ошибке в 5% в определении f_i для диапазона — $f_i = (20 \div 60)\%$.

Определение угловой погрешности. При синусоидальном первичном и несинусоидальном вторичном токах угловая погрешность характеризуется углом сдвига фаз между первичным током и первой гармоникой вторичного тока.

Если вторичная нагрузка чисто индуктивная и T_2 равна бесконечности, то потокоцепления сердечника и L_2 равны между собой; первые гармоники вторичного тока и тока намагничивания совпадают по фазе и одновременно совпадают с первичным током, а угловая погрешность равна нулю.

Наибольшая угловая погрешность δ_T получается при чисто активной нагрузке, когда $T_2 = 0$. При этом форма кривой вторичного тока имеет характерный вид отрезков синусоиды (рис. 5).

Она весьма близка к форме кривой, полученной из опыта (рис. 1). Разложение такой кривой в гармонический ряд дает следующие значения коэффициентов для первой гармоники:

$$\left. \begin{aligned} a_{(1)} &= \frac{I'_{1m}}{2\pi} (1 - \cos 2\omega t_1); \\ b_{(1)} &= \frac{I'_{1m}}{2\pi} (2\omega t_1 - \sin 2\omega t_1). \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

При этом

$$\operatorname{tg} \delta_T = \frac{a_{(1)}}{b_{(1)}} = \frac{1 - \cos 2\omega t_1}{2\omega t_1 - \sin 2\omega t_1}. \quad (18a)$$

Таким образом, угловая погрешность при данном характере нагрузки тоже однозначно связана с углом ωt_1 и поэтому может быть представлена как функция обобщенного коэффициента C . Но ее можно представить и как функцию токовой погрешности при чисто активной нагрузке (рис. 6): $\delta_T = \delta_T(f_i)$. С помощью этой характеристики можно оценить возможную максимальную угловую погрешность при различных величинах токовой погрешности. При токовой погрешности порядка 50% (иногда допускаемой) угловая погрешность может достигать 45 эл. град.

Следует отметить универсальность характеристики $\delta_T(f_i)$ так же как характеристик токовой погрешности $f_i(C)$, в том смысле, что они в одинаковой степени применимы для любого трансформатора тока при глубоком насыщении сердечника, когда реальная характеристика намагничивания может быть заменена ПХН.

Экспериментальная проверка предлагаемого метода. Для оценки пригодности предлагаемого метода определения токовых и угловых погрешностей использованы результаты испытаний трансформатора тока типа ТВ-35 ($\omega_2 = 18$; $\omega_1 = 1$; $r_T = 0,06$ ом) при синусоидальном первичном токе и активной вторичной нагрузке.

В таблице приводятся токовые и угловые погрешности, полученные из опыта при различных значениях приведенного первичного тока и сопротивления нагрузки (r_n). Там же приведены фактические значения активного сопротивления ветви вторичного тока в схеме замещения ($r_2 = r_n + 0,06$) и значения погрешностей, рассчитанные по предлагаемому методу.

Расчетные значения угловой погрешности были найдены по типовой характеристике $\delta_T(f_i)$, изображенной на рис. 6, для истинных значений токовых погрешностей. Они практически совпадают с опытными данными.

Расчетные значения токовой погрешности были найдены по типовой характеристике $f_i(C)$ для чисто активной нагрузки (кривая 1 на рис. 4) для трех значений B_s .

Значение $B_s = 1,4$ тл ($E_s = 17,2$ в) получено на основании [Л. 4 и 5], поскольку у испытуемого трансформатора тока сердечник выполнен из ленточной стали Э-42.

Значение $B_s = 1,34$ тл ($E_s = 16,35$ в) вычислено по данным опытов 1 и 4. Погрешности — 87,3% (опыт 1) по типовой характеристике 1 на рис. 4 соответствует $C = 0,048 = C_x$. Подставив в формулу (17) это значение C_x , а также значения $z_{2x} = r_{2x}$ и $I'_{1x} = I'_1$ из опыта 1, получаем:

$$1,11 E_s = 0,048 \cdot 4,26 \cdot 86,6 = 17,7 \text{ в.}$$

Токовой погрешности — 43,5% (опыт 4) по типовой характеристике 1 на рис. 4 соответствует $C = 0,365 = C_x$. При этом для значений r_2 и I'_1 из опыта 4 по формуле (17) получаем:

$$1,11 E_s = 18,60 \text{ в.}$$

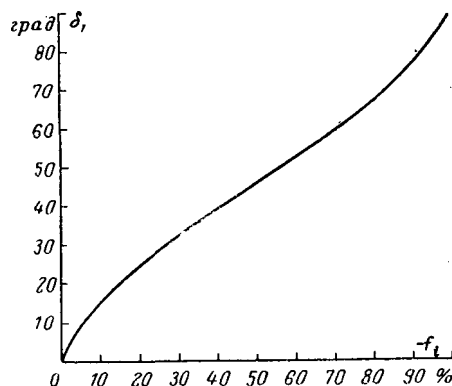


Рис. 6. Характеристика угловой погрешности трансформатора тока в зависимости от токовой погрешности при чисто активной нагрузке ветви вторичного тока.

В среднем по двум опытам:

$$E_s = 16,35 \text{ в.}$$

Сечение сердечника испытуемого трансформатора тока равно 34 см^2 . Поэтому при частоте 50 гц и $\omega_2 = 18$:

$$B_s = \frac{16,35}{4 \cdot 50 \cdot 34 \cdot 18} \cdot 10^{-4} =$$

$$= 1,335 \approx 1,34 \text{ тл.}$$

Из таблицы видно, что изменение B_s в пределах $1,3 \div 1,4 \text{ тл}$ очень мало сказывается на расчетном значении токовой погрешности. При этом расчетная токовая погрешность, определенная исходя из любого значения B_s в пределах $1,3 \div 1,4 \text{ тл}$, практически совпадает с опытными значениями погрешности; абсолютная разница между ними не превышает 5%.

Выводы. 1. Предлагаемый метод, несмотря на свою простоту, позволяет достаточно точно рассчитывать погрешности трансформатора тока в условиях глубокого насыщения сердечника.

2. Метод может быть рекомендован для применения при глубоком насыщении сердечника, когда расчетная токовая погрешность превышает $20 \div 25\%$, что соответствует значениям обобщенного коэффициента $C \leq 0,6$.

3. Для облегчения использования предлагаемого метода представляется целесообразным, чтобы в каталожных данных на трансформаторы тока указывались значения E_s или B_s .

4. Для трансформаторов тока с сердечниками из стали Э-42 можно принимать $B_s = 1,3 \div 1,4 \text{ тл}$.

5. В случае смешанной активно-индуктивной вторичной нагрузки трансформатора тока, токовую

Опытные и расчетные значения погрешностей трансформаторов тока типа ТВ-35 ($\omega_2 = 18$) при активной нагрузке

№ опытов	1	2	3	4	5	6	7	8
$I'_{11}, \text{ а}$	86,6	86,6	86,6	85	86,6	83,5	123	150
$r_{11}, \text{ ом}$	4,2	2,3	1,08	0,542	0,288	0,566	0,546	0,53
$r_2 = r_{11} + r_{12}, \text{ ом}$	4,26	2,36	1,14	0,602	0,348	0,626	0,606	0,59
из опыта $-f_4, \%$	87,3	79,4	64,2	43,5	23,7	44,9	56	60,6
$\delta, \text{ град}$	72	66	56	42	26	43	50	53
из расчета $\delta, \text{ град}$	74,5	67,5	56,2	42	27	43	50,7	54
$-f_4 (B_s = 1,3), \%$	87,3	79,4	64,5	45	20,8	46	57,5	61,8
$-f_4 (B_s = 1,34), \%$	87,3	79	63,8	44	19,3	45	56,5	61,2
$-f_4 (B_s = 1,4), \%$	87	78	61	42,5	18	43	55	60

погрешность можно рассчитывать, ориентируясь на типовую характеристику $f_i(C)$ для чисто индуктивной нагрузки (кривая 2 на рис. 4). Однако при таком допущении расчетная токовая погрешность может оказаться завышенной по абсолютному значению, но не более, чем на 10%, а допустимое сопротивление нагрузки или допустимая кратность тока могут оказаться заниженными, но не более, чем на $1/3$.

Литература

1. Федосеев А. М., Основы релейной защиты, Госэнергоиздат, 1961.
2. Дроздов А. Д., Электрические цепи с ферромагнитными сердечниками в релейной защите, изд-во «Энергия», 1965.
3. Бессонов Л. А., Теоретические основы электротехники, изд-во «Высшая школа», 1964.
4. Толстов Ю. Г. и др., Трехфазные силовые полупроводниковые выпрямители, АН СССР, 1963.
5. Боярченко М. А., Шиняевский А. В., Магнитные усилители, Госэнергоиздат, 1958.

П11.2.19671



УДК 621.316.925

О способе сравнения синусоидальных электрических величин

Инж. О. П. МАХАРАДЗЕ

Тулэнерго

Широкое распространение в схемах релейной защиты энергосистем получили устройства сравнения двух электрических величин по амплитуде и фазе, используемые в качестве реле направления мощности, сопротивления, реле тока с торможением и т. д. В то же время граничные линии срабатывания таких реле ограничиваются прямыми или окружностями, различным образом ориентированными в комплексной плоскости отношений сравниваемых величин [Л. 1]. К тому же формирующие устройства таких реле в ряде случаев весьма громоздки и сложны как схемно, так и в части технологии изготовления отдельных элементов.

По целому ряду причин, к которым в первую очередь относятся необходимость отстройки от значительных нагрузок на протяженных линиях электропередач и необходимость охвата дистанционными

ми органами повреждений через дуги больших сопротивлений, в последнее время все чаще ставится вопрос о выполнении реле с граничной линией срабатывания, отличной от прямой и окружности.

Такой желаемой формой являются характеристики, близкие к эллиптической. При этом для сильно нагруженных линий большая ось эллипса должна быть расположена под углом, равным углу сопротивления линии. В случаях, когда требуется улучшенный охват сопротивлений электрической дуги, указанное относится к малой оси эллипса.

Получение указанных характеристик на реле, сравнивающего две электрические величины, потребовало определенного дополнительного усложнения схем [Л. 2 и 3]. В связи с изложенным выше представляется определенным интерес способ сравнения

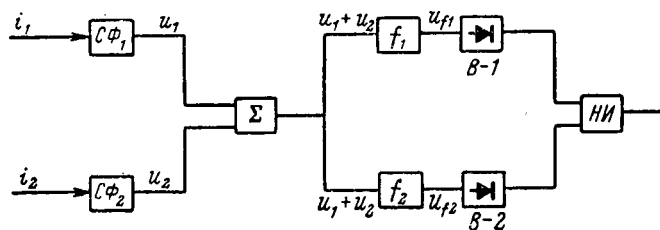


Рис. 1. Структурная схема реле сравнения двух синусоидальных электрических величин.

двух электрических величин, изложенный ниже. Основное преимущество его заключается в том, что вид граничной линии срабатывания реле становится регулируемым параметром. Это позволяет выпускать единую серию реле с сравнением двух электрических величин, например, тока и напряжения, двух токов, двух напряжений, а на месте установки в зависимости от назначения осуществлять у реле ту или иную характеристику. В статье рассмотрен только сам способ сравнения двух электрических величин. Схемы и параметры реле в статью не вошли.

В качестве сравнивающего органа (рис. 1) применяется обычная схема сравнения абсолютных значений двух электрических величин, выполненная по схеме циркуляции токов или по схеме баланса напряжений (выпрямители $B-1$ и $B-2$ и нуль-индикатор $НИ$). Входные выпрямители схемы сравнения включены на выходы фильтров основной и второй гармоник (f_1 , f_2). В свою очередь, на параллельно включенные входы фильтров основной и второй гармоник подается суммарное напряжение от формирующих устройств ($C\Phi_1$ и $C\Phi_2$). На каждое из формирующих устройств подан один из сравниваемых сигналов.

Формирующее устройство представляет из себя схему двухполупериодного несимметричного выпрямления или схему изменения амплитуды определенной полярности. При синусоидальном сигнале на входе схемы формирования выходной сигнал формирующих устройств имеет вид, представленный на рис. 2, б или 2, в.

Уравнение граничной линии срабатывания реле может быть определено из следующих соображений. Сравниваемые электрические величины I_1 и I_2

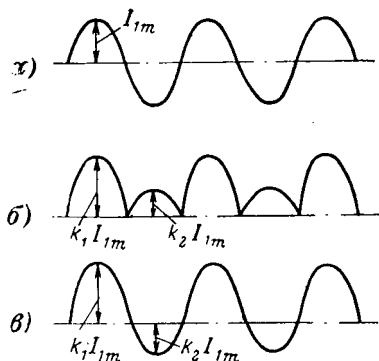


Рис. 2. Характеристики схем формирования.

а — форма входного сигнала; б — форма выходного сигнала при $k_2 > 0$; в — форма выходного сигнала при $k_2 < 0$.

в формирующих устройствах преобразуются в сигналы вида 2, б или 2, в и могут быть представлены путем разложения в ряд Фурье следующими уравнениями:

$$u_1 = k_1 I_{1m} \left(\frac{1}{\pi} + 0,5 \sin \omega t - \frac{2}{3\pi} \cos 2\omega t - \dots \right) + k_2 I_{1m} \left[\frac{1}{\pi} + 0,5 \sin (\omega t + \pi) - \frac{2}{3\pi} \cos 2(\omega t + \pi) - \dots \right] = k_1 I_{1m} \left(\frac{1}{\pi} + 0,5 \sin \omega t - \frac{2}{3\pi} \cos 2\omega t - \dots \right) + k_2 I_{1m} \left(\frac{1}{\pi} - 0,5 \sin \omega t - \frac{2}{3\pi} \cos 2\omega t - \dots \right); \quad (1)$$

$$u_2 = k_3 I_{2m} \left[\frac{1}{\pi} + 0,5 \sin (\omega t + \varphi) - \frac{2}{3\pi} \cos 2(\omega t + \varphi) - \dots \right] + k_4 I_{2m} \left[\frac{1}{\pi} - 0,5 \sin (\omega t + \varphi) - \frac{2}{3\pi} \cos 2(\omega t + \varphi) - \dots \right], \quad (2)$$

где k_1 , k_2 — коэффициенты пропорциональности между входным сигналом I_1 и амплитудами выходных сигналов $C\Phi_1$ в первый и второй полупериод (рис. 2, б и 2, в);

k_3 , k_4 — то же для входного сигнала I_2 ; I_{1m} и I_{2m} — амплитудные значения сравниваемых электрических величин;

φ — угол между ними.

Знак коэффициента k_2 зависит от формы выходного сигнала; по форме рис. 2, б $k_2 > 0$, по форме рис. 2, в $k_2 < 0$.

Следует учесть, что знак при коэффициенте k_3 может быть отрицательным. Это значит, что в случае совпадения по фазе I_1 и I_2 первая полуволна сигнала I_2 на выходе схемы формирования $C\Phi_2$ имеет полярность, противоположную полярности первой полуволны выходного сигнала $C\Phi_1$.

Выходные сигналы с $C\Phi_1$ и $C\Phi_2$ поступают на суммирующее устройство, которое обеспечивает на выходе сигнал $u_1 + u_2$.

Выходное напряжение суммирующего устройства $u_1 + u_2$ поступает на фильтры основной и второй гармоник.

Считая, что фильтры пропускают только напряжение частоты настройки, можно записать следующие выражения для выходных напряжений фильтров:

$$u_{f1} = k_{f1} \{ k_1 I_{1m} \cdot 0,5 \sin \omega t - k_2 I_{1m} \cdot 0,5 \sin \omega t + k_3 I_{2m} \cdot 0,5 \sin (\omega t + \varphi) - k_4 I_{2m} \cdot 0,5 \sin (\omega t + \varphi) \}; \quad (3)$$

$$u_{f2} = k_{f2} \left\{ -k_1 I_{1m} \frac{2}{3\pi} \cos 2\omega t - \right.$$

$$- \dot{k}_2 I_{1m} \frac{2}{3\pi} \cos 2\omega t - \dot{k}_3 I_{2m} \frac{2}{3\pi} \cos 2(\omega t + \varphi) - \\ - \dot{k}_4 I_{2m} \frac{2}{3\pi} \cos(\omega t + \varphi) \}, \quad (4)$$

где k_{f1} и k_{f2} — коэффициенты фильтров основной и второй гармоник.

Преобразуя выражения (3) и (4), получим:

$$u_{f1} = k_{f1} \dot{k}_1 I_{1m} 0,5 \left\{ \sin \omega t - \frac{\dot{k}_2}{\dot{k}_1} \sin \omega t + \right. \\ \left. + \frac{\dot{k}_3}{\dot{k}_1} \left[\frac{I_{2m}}{I_{1m}} \sin(\omega t + \varphi) - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{I_{2m}}{I_{1m}} \frac{\dot{k}_4}{\dot{k}_3} \sin(\omega t + \varphi) \right] \right\} = \\ = k_{f1} \dot{k}_1 I_{1m} 0,5 \left\{ \left(1 - \frac{\dot{k}_2}{\dot{k}_1} \right) \sin \omega t + \right. \\ \left. + \frac{\dot{k}_3}{\dot{k}_1} \left(1 - \frac{\dot{k}_4}{\dot{k}_3} \right) \frac{I_{2m}}{I_{1m}} \sin(\omega t + \varphi) \right\}. \quad (5)$$

Аналогично,

$$u_{f2} = -k_{f2} \dot{k}_1 I_{1m} \frac{2}{3\pi} \left\{ \left(1 + \frac{\dot{k}_2}{\dot{k}_1} \right) \cos 2\omega t + \right. \\ \left. + \frac{\dot{k}_3}{\dot{k}_1} \left(1 + \frac{\dot{k}_4}{\dot{k}_3} \right) \frac{I_{2m}}{I_{1m}} \cos 2(\omega t + \varphi) \right\}. \quad (6)$$

Выходные напряжения фильтров поступают на входы схемы сравнения абсолютных значений электрических величин. Условием срабатывания нуля индикатора схемы сравнения будет равенство модулей \dot{u}_{f1} и \dot{u}_{f2} или

$$\frac{|u_{f1}|}{|u_{f2}|} = 1 = \\ = \frac{k_{f1} \dot{k}_1 I_{1m} 0,5 \left| \left(1 - \frac{\dot{k}_2}{\dot{k}_1} \right) + \frac{\dot{k}_3}{\dot{k}_1} \left(1 - \frac{\dot{k}_4}{\dot{k}_3} \right) \frac{I_{2m}}{I_{1m}} e^{j\varphi} \right|}{k_{f2} \dot{k}_1 I_{1m} \frac{2}{3\pi} \left| \left(1 + \frac{\dot{k}_2}{\dot{k}_1} \right) + \frac{\dot{k}_3}{\dot{k}_1} \left(1 + \frac{\dot{k}_4}{\dot{k}_3} \right) \frac{I_{2m}}{I_{1m}} e^{j2\varphi} \right|}. \quad (7)$$

Преобразуем полученное уравнение. Для этого обозначим:

$$\frac{\dot{k}_2}{\dot{k}_1} = k_{21}, \quad \frac{\dot{k}_3}{\dot{k}_1} = k_{31}, \quad \frac{\dot{k}_4}{\dot{k}_3} = k_{34}, \quad \frac{k_{f1}}{k_{f2}} = k_f.$$

Тогда

$$1 = \frac{k_f 2,35 \left| (1 - k_{21}) + k_{31} (1 - k_{34}) \frac{I_{2m}}{I_{1m}} e^{j\varphi} \right|}{\left| (1 + k_{21}) + k_{31} (1 + k_{34}) \frac{I_{2m}}{I_{1m}} e^{j2\varphi} \right|}. \quad (8)$$

Определим абсолютные значения числителя и знаменателя:

$$1 = \frac{k_f 2,35 \sqrt{(1 - k_{21})^2 + 2k_{31}(1 - k_{34})(1 - k_{21}) \frac{I_{2m}}{I_{1m}} \cos \varphi + k_{31}^2 (1 - k_{34})^2 \frac{I_{2m}^2}{I_{1m}^2}}}{\sqrt{(1 + k_{21})^2 + 2k_{31}(1 + k_{21})(1 + k_{34}) \frac{I_{2m}}{I_{1m}} \cos 2\varphi + k_{31}^2 (1 + k_{34})^2 \frac{I_{2m}^2}{I_{1m}^2}}}. \quad (9)$$

Возводя в квадрат обе части равенства, проводя преобразования и обозначив $\frac{I_{2m}}{I_{1m}} = z \geq 0$, получим:

$$2,35^2 k_f^2 [(1 - k_{21})^2 + 2k_{31}(1 - k_{34})(1 - k_{21})z \cos \varphi + \\ + k_{31}^2 (1 - k_{34})^2 z^2] = (1 + k_{21})^2 + \\ + 2k_{31}(1 + k_{21})(1 + k_{34})z \cos 2\varphi + \\ + k_{31}^2 (1 + k_{34})^2 z^2, \\ z^2 [2,35^2 k_f^2 k_{31}^2 (1 - k_{34})^2 - k_{31}^2 (1 + k_{34})^2] + \\ + z [2,35^2 k_f^2 2k_{31}(1 - k_{34})(1 - k_{21}) \cos \varphi - \\ - 2k_{31}(1 + k_{21})(1 + k_{34}) \cos 2\varphi] + \\ + 2,35^2 k_f^2 (1 - k_{21})^2 - (1 + k_{21})^2 = 0 \quad (10)$$

или

$$az^2 + bz + c = 0, \quad (11)$$

где

$$a = k_{31}^2 [k_f^2 (1 - k_{34})^2 - 0,18(1 + k_{34})^2] = k_{31}^2 a'; \quad (12a)$$

$$b = 2k_{31} [k_f^2 (1 - k_{21})(1 - k_{34}) \cos \varphi - \\ - 0,18(1 + k_{21})(1 + k_{34}) \cos 2\varphi] = k_{31} b'; \quad (12b)$$

$$c = k_f^2 (1 - k_{21})^2 - 0,18(1 + k_{21})^2. \quad (12b)$$

Ниже приведены результаты анализа полученного уравнения граничной линии срабатывания реле в полярных координатах при некоторых конкретных значениях коэффициентов уравнения (11).

1. Характер граничной линии срабатывания реле не зависит от значения коэффициента k_{31} . Значение коэффициента k_{31} определяет только масштаб. Изменением коэффициента k_{31} можно изменять уставку реле при заданной форме характеристики. Это подтверждается следующим.

Величина z определится из уравнения (11) с учетом (12a), (12b), (12в):

$$z = \frac{-k_{31} b' \pm \sqrt{k_{31}^2 b'^2 - 4k_{31}^2 a' c}}{2k_{31}^2 a'} = \\ = \frac{1}{k_{31}} \frac{-b' \pm \sqrt{b'^2 - 4a' c}}{2a'}.$$

Последнее уравнение показывает, что при данном угле от коэффициента k_{31} зависит только абсолютное значение z .

2. Граничная линия срабатывания реле представляет собой незамкнутую кривую, если коэффициент a при z^2 равен нулю, так как в этом случае

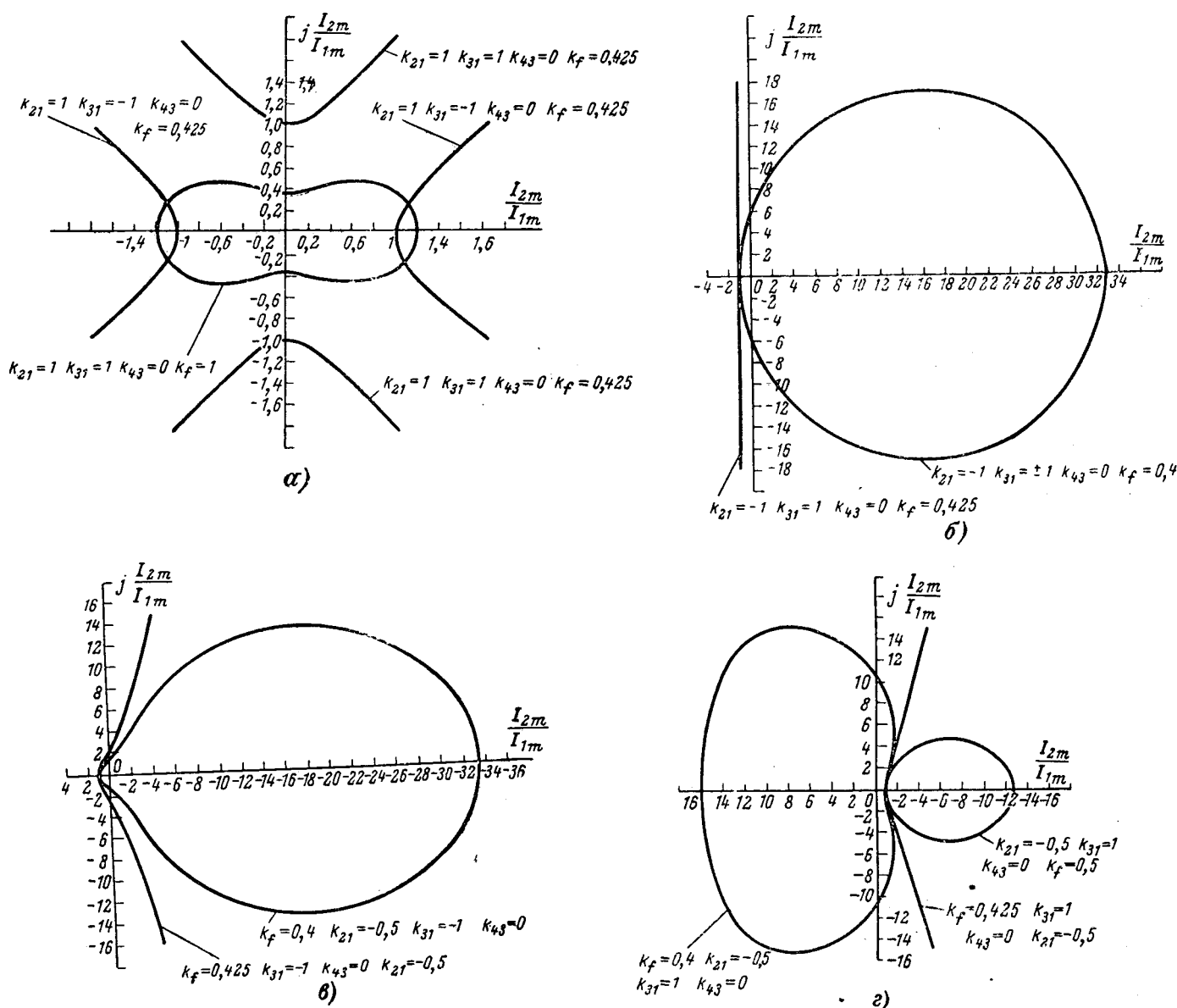


Рис. 3. Граничные линии срабатывания реле при различных коэффициентах.

$bz + c = 0$; $z = -\frac{c}{b}$, значит z есть однозначная функция $\cos \varphi$.

Следовательно, граничная линия представляет незамкнутую кривую при

$$\left. \begin{aligned} k_f^2 (1 - k_{43})^2 - 0,18(1 + k_{43})^2 &= 0, \\ k_f &= \sqrt{\frac{0,18(1 + k_{43})^2}{(1 - k_{43})^2}}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Следует отметить, что всегда $k_f > 0$.

3. Граничная линия срабатывания реле проходит через начало координат, если свободный член уравнения $c = 0$, т. е.

$$\left. \begin{aligned} k_f^2 (1 - k_{21})^2 - 0,18(1 + k_{21})^2 &= 0; \\ k_f &= +\sqrt{\frac{0,18(1 + k_{21})^2}{(1 - k_{21})^2}}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

На рис. 3 построены граничные линии срабатывания реле для частного случая, когда $k_{43} = 0$, т. е.

когда один из сигналов преобразуется в однополупериодной схеме выпрямления. Характерным для построенных линий является следующее:

1. При $k_f = 0,425$ (получено из уравнения (13) при $k_{43} = 0$).

Граничная линия является незамкнутой и имеет вид либо прямой, либо кривой с прямолинейными лучами или с ветвями, асимптотически приближающимися к лучам, которые исходят из начала координат или другой точки плоскости.

2. При увеличении или уменьшении k_f незамкнутые линии замыкаются. При этом они либо охватывают, либо не охватывают начало координат в зависимости от того, больше или меньше 0 коэффициент k_{21} и больше или меньше 0,425 коэффициент k_f .

Ниже рассматриваются особенности граничной линии при $k_{21} = -0,5$.

1. При $k_f = 0,425$ граничные линии представляют собой незамкнутые кривые, ветви которых асимпто-

тически приближаются к лучам, исходящим из начала координат. В зависимости от знака коэффициента k_{31} граничная линия охватывает зоны либо с положительными и отрицательными значениями $\frac{I_{2m}}{I_{1m}}$, либо только со значениями одного знака.

2. При $k_f > 0,425$ ветви граничной линии по мере увеличения коэффициента k_f сходятся в сторону отрицательной вещественной оси и характеристика приобретает форму, близкую к эллипсу, причем начало координат расположено на его большой оси. В зависимости от знака коэффициента k_{31} полученные характеристики либо охватывают, либо не охватывают начало координат.

3. При $k_f < 0,425$ по мере уменьшения коэффициента k_f ветви граничной линии сходятся в сторону положительной вещественной оси. Граничная линия приобретает форму эллипса, причем начало координат расположено на его малой оси. В зависимости от знака k_{31} характеристика либо охватывает, либо не охватывает начало координат.

Рассмотрим особенности граничной линии при $k_{21} = -1$.

1. При $k_f = 0,425$ граничная линия представляет собой прямую, параллельную вещественной оси. Уменьшением k_{31} прямая приближается к началу координат.

2. При уменьшении k_f ветви граничной линии сходятся в сторону положительных $\frac{I_{2m}}{I_{1m}}$, и граничная линия превращается в характеристику, близкую к окружности (или, возможно, в окружность, но это не проверено).

3. При отрицательных k_{31} граничные линии являются зеркальным отображением описанных линий относительно оси $j \frac{I_{2m}}{I_{1m}}$.

Наконец, при $k_{21} = 1$ и $k_f = 0,425$ граничная линия распадается на две кривые линии типа гипербол,

вершины которых лежат в точках $(0, \pm j1)$ для $k_{31} = +1$ и в точках $(\pm 1, j0)$ для $k_{31} = -1$. При увеличении k_f ветви граничных линий сходятся к оси действительных значений $\frac{I_{2m}}{I_{1m}}$ для $k_{31} = 1$ и к оси мнимых значений для $k_{31} = -1$. Вершина кривой приближается к началу координат.

Все кривые построены для $k_{21} = 1$ и $k_{31} = -1$. Однако их характер, как указано выше, меняется только в зависимости от знака k_{31} .

Таким образом, изменением значений коэффициентов k_{21} , k_{31} , k_f можно в широких пределах изменять характер граничной линии. Изменение коэффициента k_{43} дополнительно расширяет диапазон характеристик.

Примененные в описанном способе схемы формирования представляют собой простейшие устройства, состоящие из активных сопротивлений и полупроводниковых диодов.

Указанное определяет простоту изменения коэффициентов $k_1 - k_4$ путем изменения значений сопротивлений схем формирования, что по сути дела позволяет очень просто менять характер граничной линии срабатывания реле.

Выводы. 1. Реле сравнения двух электрических величин, выполненное рассмотренным способом, позволяет получить граничные линии срабатывания в комплексной плоскости отношения сравниваемых величин, отличные от прямой и окружности.

2. Характер граничной линии срабатывания реле может просто изменяться, что позволяет использовать одно и то же реле в различных целях.

Литература

1. Федосеев А. М., Основы релейной защиты, Госэнергоиздат, 1961.
2. Альтшуллер В. А. и др., Трехступенчатая дистанционная защита, «Электрические станции», 1964, № 8.
3. Сапир Е. Д. и Левиуш А. И., Реле сопротивления с эллиптической характеристикой, «Электричество», 1962, № 5.

[15.4.1967]

УДК 621.778.1.06—83

Исследование работы электропривода управляемого прямооточного волочильного стана в режиме разгона

Канд. техн. наук В. М. ПУСТЫЛЬНИКОВ и инж. А. Т. АХМАДИЕВ

Алма-Ата

Прямоточные станы относятся к станам многократного волочения, в которых проволока с барабана следует непосредственно в волоку и затем на следующий барабан. Необходимое соотношение между скоростями вращения барабанов осуществляется за счет саморегулирования стана, обеспечиваемого последовательным соединением якорей двигателей. Прямоточные станы имеют наиболее простую конструкцию по сравнению с другими волочильными станами и обеспечивают высокое качество выпускаемой проволоки, в связи с чем в настоящее время они являются наиболее перспектив-

ными, особенно при волочении стальной проволоки, когда перегибы недопустимы [Л. 1 и 2].

Однако при высоких скоростях волочения, а также в режиме разгона саморегулирование стана часто не обеспечивает его устойчивой работы и приводит к обрывам проволоки. Устойчивую работу стана в этих случаях можно обеспечить, применив систему автоматического управления, построенную как система стабилизации всех противонатяжений в стане. Действительно, устойчивость работы стана определяется прежде всего достаточной стабильностью противонатяжений. К тому же противонатя-

Вологодская областная универсальная научная библиотека

www.booksite.ru

жения являются параметрами, наиболее чувствительными к малейшим изменениям режима работы двигателей. Применение системы автоматического управления, кроме того, позволит исключить последовательное соединение якорей двигателей, требующее использования нестандартного высоковольтного генератора.

Одним из наиболее тяжелых режимов работы стана является разгон, когда должно произойти изменение противонапряжений в больших пределах: от некоторых начальных значений, определяемых заправкой стана и обычно близких к нулю, до установленных значений. Для исключения обрывов проволоки при разгоне подъем противонапряжений должен происходить достаточно плавно и без переуправления.

В данной работе исследуются основные характеристики процесса разгона прямооточного стана с системой управления.

Структурная схема четырехкратного управляемого прямооточного стана с параллельным соединением якорей двигателей представлена на рис. 1.

Найдем значения противонапряжений и скоростей вращения двигателей, устанавливающиеся после разгона. Для этого запишем уравнение, характеризующее основные соотношения в стане в статическом режиме [Л. 2]:

$$T_i = B_i - P_i + P_{i-1}, \quad (1)$$

где T_i — тяговые усилия на барабанах;

$$i = 1, 2, 3, \dots, n;$$

n — число протяжек.

В уравнении (1) для первого блока стана $P_{i-1} = 0$, для последнего блока $P_i = 0$.

При параллельном соединении якорей двигателей выражение для тяговых усилий $(T_i)_0$ при номинальных значениях потоков Φ_i записывается в виде:

$$(T_i)_0 = \frac{\alpha_i}{R} c_m \Phi_i I_{\pi i} = \alpha_i \Phi_i \frac{c_m U_{\pi}}{Rr} - \alpha_i \Phi_i^2 \frac{c_m k_e}{Rr} \Omega_i, \quad (2)$$

где $I_{\pi i}$ — ток якоря;

α_i — передаточное число редуктора;

R — радиус барабана;

c_m — конструктивный коэффициент двигателя;

Ω_i — угловая скорость двигателя;

r — равные сопротивления якорей двигателей;

k_e — постоянный коэффициент;

U_{π} — напряжение якорей двигателей.

Первое слагаемое в правой части выражения (2) равно начальному тяговому усилию T_{ni} . Второе слагаемое соответствует противоусилию, создаваемому за счет э. д. с. двигателя.

Предположим, что в статическом режиме потоки возбуждения двигателей отличаются от установленных перед разгоном значений Φ_i на доста-

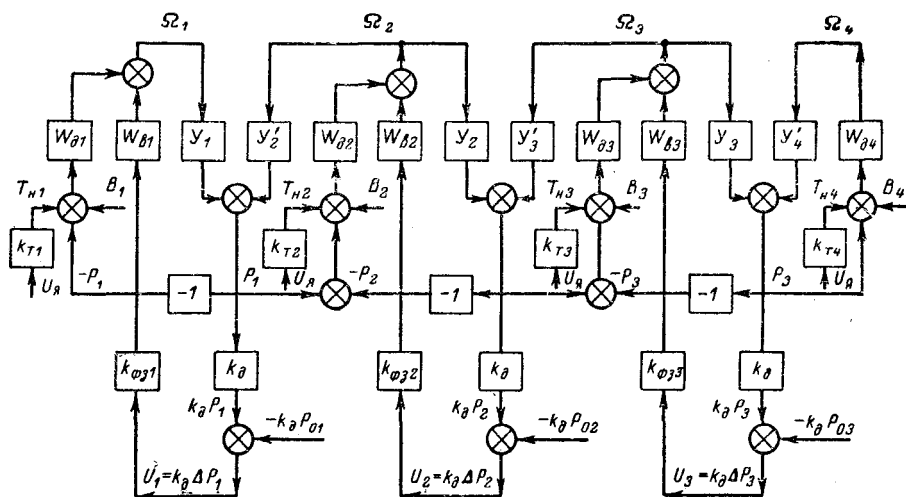


Рис. 1. Структурная схема системы управления станом.

точно малые величины $\Delta\Phi_i$. Тогда общее выражение для тягового усилия можно записать в виде:

$$\begin{aligned} T_i &= (T_i)_0 + \frac{\partial (T_i)_0}{\partial \Phi_i} \Delta\Phi_i = \\ &= \alpha_i \Phi_i \frac{c_m U_{\pi}}{Rr} - \alpha_i \Phi_i^2 \frac{c_m k_e}{Rr} \Omega_i + \\ &+ \frac{\alpha_i c_m}{Rr} (U_{\pi} - 2k_e \Phi_i \Omega_i) \Delta\Phi_i. \end{aligned} \quad (3)$$

Величины $\Delta\Phi_i$ создаются за счет сигналов из контуров управления и в статическом режиме пропорциональны отклонениям соответствующих противонапряжений от заданных значений:

$$\Delta\Phi_i = k_{yi} (P_i - P_{oi}), \quad (4)$$

где k_{yi} — общий коэффициент усиления датчика противонапряжения, усилительного тракта контура управления и обмотки возбуждения двигателя.

Подставляя значение для $\Delta\Phi_i$ из (4) в (3) и обозначая

$$\frac{\alpha_i c_m}{Rr} (U_{\pi} - 2k_e \Phi_i \Omega_i) k_{yi} = k_i, \quad (5)$$

находим

$$T_i = \alpha_i \Phi_i \frac{c_m U_{\pi}}{Rr} - \alpha_i \Phi_i^2 \frac{c_m k_e}{Rr} \Omega_i + k_i (P_i - P_{oi}). \quad (6)$$

Подставив далее выражение для $\Delta\Phi_i$ из (6) в уравнение (1), получим окончательное уравнение:

$$\begin{aligned} \alpha_i \Phi_i \frac{c_m U_{\pi}}{Rr} - \alpha_i \Phi_i \frac{c_m k_e}{Rr} \Omega_i = \\ = B_i - P_i + P_{i-1} - k_i (P_i - P_{oi}). \end{aligned} \quad (7)$$

Рассматривая четырехкратный стан и решая систему уравнений, образуемую подстановкой в (7) значений $i = 1, 2, 3, 4$ (при учете равенств $P_{i-1} = 0$ для $i = 1$ и $P_i = 0$ для $i = 4$) совместно с соотношениями для скоростей вращения двигателей в статическом режиме

$$\frac{\Omega_i}{\Omega_k} = \frac{\alpha_i S_k}{\alpha_k S_i}, \quad (8)$$

где S_k, S_i — сечения волок, можно получить выражения для значений противонапряжений и скоростей вращения двигателей, устанавливающихся по-

сле разгона, в функции напряжения якорей $U_{я}$, давлений на волокна B_i и заданных величин противонапряжений P_{0i} в виде

$$P_i = \frac{a_{iu}U_{я} + \sum_{j=1}^4 a_{ij}B_j + \sum_{j=1}^3 b_{ij}P_{0j}}{D_0}, \quad (9)$$

где $i=1, 2, 3$ и

$$\Omega_i = \frac{a_i Rr}{S_i c_m k_e} \cdot \frac{a_{0u}U_{я} + \sum_{j=1}^4 a_{0j}B_j + \sum_{j=1}^3 b_{0j}P_{0j}}{D_0}, \quad (10)$$

где $i=1, 2, 3, 4$.

Величина D_0 и коэффициенты a_{iu} , a_{ij} , b_{ij} , a_{0u} , a_{0j} , b_{0j} являются сложными функциями величин Φ_i , α_i , S_i , k_i , и поэтому использование выражений (9) и (10) для практических расчетов весьма затруднительно. В то же время существенный интерес для практики представляет случай, когда с целью обеспечения малых погрешностей $\Delta P_i = P_i - P_{0i}$ величины коэффициентов усиления k_i выбираются достаточно большими, так что

$$k_i \gg 1 \quad (11)$$

для $i=1, 2, 3$.

В этом случае в правой части уравнения (7) можно пренебречь величинами P_i и P_{i-1} и записать приближенно уравнения стана в виде:

$$\begin{aligned} & \alpha_i \Phi_i \frac{c_m U_{я}}{Rr} - \\ & - \alpha_i \Phi_i^2 \frac{c_m k_e}{Rr} \Omega_i = B_i - k_i (P_i - P_{0i}) \end{aligned} \quad (12)$$

для $i=1, 2, 3$ и

$$\alpha_4 \Phi_4 \frac{c_m U_{я}}{Rr} - \alpha_4 \Phi_4^2 \frac{c_m k_e}{Rr} \Omega_4 = B_4 + P_3. \quad (13)$$

Решая теперь совместно уравнения (8), (12) и (13) и учитывая условие (11), получаем приближенные значения установившихся после разгона величин P_i и Ω_i

$$\begin{aligned} P_i &= P_{0i} + \frac{b_1}{k_i} \alpha_i \Phi_i \left(\frac{\alpha_i \Phi_i}{S_i} - \frac{\alpha_4 \Phi_4}{S_4} \right) U_{я} - \\ & - \frac{b_2}{k_i} \frac{\alpha_i^2 \Phi_i^2}{S_i} (B_4 + P_{03}) + \frac{B_i}{k_i}, \end{aligned} \quad (14)$$

где $i=1, 2, 3$;

$$\left. \begin{aligned} b_1 &= \frac{c_m S_4}{\alpha_4 \Phi_4 Rr}; \\ b_2 &= \frac{S_4}{\alpha_4^2 \Phi_4^2}, \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

и

$$\Omega_i = \frac{\alpha_i S_4}{\alpha_4 S_i} \left[\frac{U_{я}}{k_e \Phi_4} - \frac{Rr}{c_m k_e \alpha_4 \Phi_4^2} (B_4 + P_{03}) \right], \quad (16)$$

где $i=1, 2, 3, 4$.

Как видно из выражения (14), противонапряжения P_i , устанавливающиеся после разгона, отличаются от своих заданных значений P_{0i} на некоторую величину погрешности $\Delta P_i = P_i - P_{0i}$, состоящую из

трех слагаемых, пропорциональных величинам $U_{я}$, $B_4 + P_{03}$, B_i , причем каждое из слагаемых обратно пропорционально коэффициенту усиления k_i .

Для практических расчетов формулу (14) можно еще более упростить. Величины $\frac{\alpha_i \Phi_i}{S_i}$ и $\frac{\alpha_4 \Phi_4}{S_4}$ имеют

один порядок и поэтому можно принять

$$\frac{\alpha_i \Phi_i}{S_i} - \frac{\alpha_4 \Phi_4}{S_4} \approx 0.$$

Тогда погрешность ΔP_{is} оказывается зависящей только от значения P_{03} и давлений на волокна B_i и B_4 в данном блоке и последнем блоке стана:

$$\begin{aligned} \Delta P_{is} &= P_i - P_{0i} = \frac{B_i}{k_i} - \\ & - \frac{b_2}{k_i} \frac{\alpha_i^2 \Phi_i^2}{S_i} (B_4 + P_{03}). \end{aligned} \quad (17)$$

При достаточно больших значениях k_i погрешность ΔP_{is} оказывается очень малой: $\Delta P_{is} \rightarrow 0$ и тогда можно считать, что величины противонапряжений после разгона устанавливаются практически равными своим заданным значениям

$$P_i \approx P_{0i}. \quad (18)$$

Однако в более общем случае погрешность установления значений противонапряжений в результате разгона можно оценить по формуле (17); по этой формуле можно также выбрать значения k_i , обеспечивающие заданные допустимые величины погрешностей.

Кроме того, с помощью формулы (17) можно найти изменения противонапряжений, имеющие место в установившемся режиме работы стана вследствие появления возмущающих воздействий, возникающих по причинам технологического характера и проявляющихся в виде изменений давлений на волокна [Л. 3]

$$F_i = \Delta B_i. \quad (19)$$

В соответствии с формулой (17) изменения противонапряжений ΔP_{iF} , обусловленные возмущающими воздействиями, определяются выражением

$$\Delta P_{iF} = \frac{F_i}{k_i} - \frac{b_2}{k_i} \frac{\alpha_i^2 \Phi_i^2}{S_i} F_4, \quad (20)$$

где $i=1, 2, 3$.

При достаточно больших k_i величины ΔP_{iF} также будут очень малыми, т. е. рассматриваемая система обеспечивает также стабилизацию противонапряжений с высокой точностью в установившемся режиме работы стана.

Как следует из (16), скорости вращения двигателей, устанавливающиеся после разгона, практически определяются лишь режимом работы последнего двигателя, т. е. зависят только от параметров последнего блока и усилия нагрузки на последнем барабане. Действительно, значение установившейся скорости вращения двигателя с неизменным потоком возбуждения Φ в зависимости от напряжения $U_{я}$ на его якоре и усилия нагрузки F_H на барабане может быть выражено формулой

$$\Omega = \frac{U_{я}}{k_e \Phi} - \frac{Rr}{c_m k_e \alpha \Phi^2} F_H. \quad (21)$$

а усилие нагрузки на барабане четвертого блока в данном случае равно:

$$F_n = B_4 + P_3 \approx B_4 + P_{03}. \quad (22)$$

С целью выяснения характера переходных процессов установления противонатяжений при разгоне было проведено исследование работы стана на электронной модели. Схема модели была построена в соответствии со структурной схемой, приведенной на рис. 1, при учете следующих выражений для передаточных функций ее звеньев:

$$\left. \begin{aligned} Y_i &= \frac{k_{ui}}{p}; & K_{\Phi zi} &= k_{\Phi zi} (1 + \lambda_i p); \\ W_{di} &= \frac{k_{Fi}}{T_{mi} p + 1}; \\ W_{li} &= \frac{k_{wi}}{(T_{mi} p + 1)(T_{wi} p + 1)}; \\ k_{Ti} &= \alpha_i \Phi_i \frac{c_m}{Rr}, \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

где T_{mi} и T_{wi} — электромеханические постоянные времени и постоянные времени цепи обмотки возбуждения двигателей;

λ_i — коэффициенты форсировки.

Коэффициенты усиления звеньев имеют значения

$$\left. \begin{aligned} k_{ui} &= \frac{ERS_i}{\alpha_i L}; & k_{Fi} &= \frac{Rr}{\sigma_i c_m k_e \Phi_i^2}; \\ k_{wi} &= \frac{k_{yni} k_{\Phi i} (U_n - 2k_e \Phi_i \Omega_i)}{k_e \Phi_i^2 r_n}, \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

где E — модуль упругости волоочимой проволоки;
 L — длина участка с противонатяжением P_i между барабаном и передней волокой;

k_{yni} — коэффициент усиления по напряжению усилителя, питающего обмотку возбуждения двигателя;

$k_{\Phi i}$ — коэффициент, связывающий приращение ΔI_B тока возбуждения с приращением $\Delta \Phi_i$ и определяемый по характеристике намагничивания двигателя;

r_n — сопротивление цепи обмотки возбуждения двигателя.

Так как

$$k_{yi} = k_d k_{\Phi zi} k_{yni} \frac{k_{\Phi i}}{r_n}, \quad (25)$$

то в соответствии с равенством (5) можно найти, что коэффициенты k_{wi} и k_i связаны между собой соотношением

$$k_{wi} = k_i \frac{k_{Fi}}{k_d k_{\Phi zi}}. \quad (26)$$

Значения коэффициентов $k_{\Phi zi}$ и λ_i определяются конкретной схемой, образующей форсирующее звено [Л. 4].

Параметры схемы модели были рассчитаны применительно к первым четырем блокам стана ВС-6/7-350 при работе его в одном из типовых режимов с маршрутом волоочения стальной проволоки 3—2,45—2,05—1,7—1,4—1,15—1,0. Входящие в вышеприведенные формулы постоянные величины (одинаковые для всех блоков) для этого стана имеют значения:

$$R = 175 \text{ мМ}; r = 0,0329 \text{ ом};$$

$$c_m = 3,14; k_e = \frac{30}{\pi} c_e = 33,4;$$

$$r_n = 50,6 \text{ ом}; U_n = 105 \text{ в}$$

(в прямоточном стане ВС-6/7-350 используются двигатели постоянного тока типа П82, рассчитанные на питание цепи якоря напряжением 100—110 в).

Значения α_i и S_i , принятые величины Φ_i , определяющие режим стана, вычисленные для данного режима значения $k_{\Phi i}$, T_{mi} и T_{wi} , нормальные величины B_i для указанного маршрута волоочения и заданные значения противонатяжений P_{0i} приведены в таблице.

i (номер блока)	α_i	S_i , мм ²	Φ_i , в.сек	$\frac{k_{\Phi i}}{\alpha}$, в.сек	T_{mi} , сек	T_{wi} , сек	B_i , кг	P_{0i} , кг
1	6,81	4,71	$1,85 \cdot 10^{-2}$	$0,936 \cdot 10^{-2}$	0,126	0,07	368	150
2	5,08	3,30	$1,79 \cdot 10^{-2}$	$1,78 \cdot 10^{-2}$	0,141	0,13	252	70
3	3,83	2,27	$1,68 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$	0,166	0,16	188	50
4	2,95	1,54	$1,53 \cdot 10^{-2}$	$3,03 \cdot 10^{-2}$	0,213	0,22	155	

Для расчета параметров модели необходимо также знать величины коэффициентов k_i , что даст возможность определить с помощью соотношения (26) величины произведений $k_{wi} k_{\Phi zi} k_d$, а затем и значения коэффициентов усиления полных замкнутых контуров управления

$$k_{0i} = k_{wi} k_{\Phi zi} k_d k_{ui}. \quad (27)$$

Величины k_i можно найти с помощью формулы (17), исходя из требования малости погрешностей ΔP_{is} . Для приведенных параметров стана по формуле (17) с учетом (15) получаем:

$$\Delta P_{1s} = -\frac{145}{k_1} \text{ кг}; \quad \Delta P_{2s} = -\frac{131}{k_2} \text{ кг};$$

$$\Delta P_{3s} = -\frac{95}{k_3} \text{ кг}.$$

Выбраны значения $k_1 = k_2 = k_3 = 50$, что обеспечивает допустимо малые величины погрешностей установления противонатяжений:

$$\Delta P_{1s} = -2,9 \text{ кг}; \quad \Delta P_{2s} = -2,6 \text{ кг}; \quad \Delta P_{3s} = -1,9 \text{ кг}.$$

Будем считать, что после заправки стана перед разгоном проволока ослаблена настолько, что все противонатяжения практически равны нулю. В этом случае начальные отклонения ΔP_{in} противонатяжений от заданных значений равны

$$\Delta P_{in} = -P_{0i}. \quad (28)$$

В процессе разгона противонатяжения должны увеличиться до значений P_i и при этом величины $\Delta P_i = P_i - P_{0i}$ должны достигнуть значений ΔP_{is} . Таким образом, при разгоне происходит изменение значений ΔP_i от (28) до значений ΔP_{is} , причем

$$|\Delta P_{is}| < |\Delta P_{in}| \quad (\Delta P_i < 0),$$

т. е. значения ΔP_i в процессе разгона по абсолютной величине уменьшаются.

Характер кривых указанных изменений является основным показателем процесса разгона. Изучение характера этих кривых и было предметом

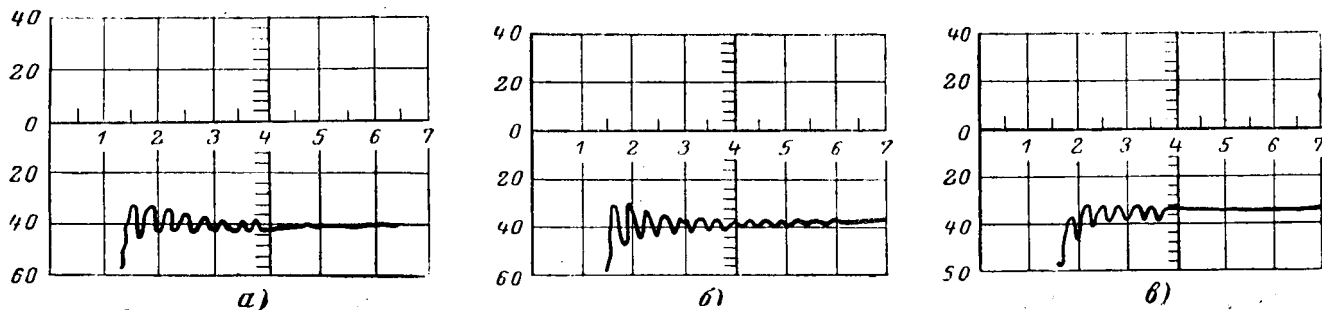


Рис. 2. Осциллограммы переходных процессов.

а — ΔP_1 ; б — ΔP_2 ; в — ΔP_3 .

исследования на модели, причем необходимо было подобрать значения коэффициентов форсировки λ_i , обеспечивающие наилучший ход процесса.

В процессе исследования на модель подавались ступенчатые напряжения, изображающие напряжение якорей U_{α} и заданные величины противонапряжений P_{0i} ; при этом исследовались все величины ΔP_i . Осциллограммы переходных процессов изменений ΔP_i , полученных при значениях $\lambda_1=0,18$ сек, $\lambda_2=0,26$ сек, $\lambda_3=0,31$ сек представлены на рис. 2 (началу процесса разгона соответствует резкий выброс вниз). Как следует из осциллограмм, система управления обеспечивает удовлетворительный характер изменений противонапряжений при разгоне стана: величины ΔP_i изменяются без больших колебаний и за время переходного процесса практически не приобретает положительных значений. Это означает, что противонапряжения в любой момент периода разгона не превосходят своих установленных значений, и потому число обрывов проволоки при разгоне управляемого стана должно быть существенно меньшим, чем в стане с саморегулированием.

Кроме того, следует отметить, что в данном случае моделировалась резкая подача полного напряжения U_{α} на двигатель. Это позволяет сделать вывод, что управление станом с помощью рассматриваемой системы позволит поднимать напряжение якорей значительно быстрее, чем в станах с саморегулированием, и осуществлять тем самым быстрый разгон.

Реализацию предлагаемой системы управления можно осуществить на существующих прямоточных станах. Для этого необходимо включить якоря двигателей параллельно и подсоединить их к зажимам генератора постоянного тока, установив требуемую величину напряжения генератора. Здесь целесообразно использовать генератор и соответствующую часть схемы электропривода одного из типов петлевых волоочильных станов. Обмотки возбуждения двигателей подключаются к системе управления в соответствии с принципиальной схемой управляемого прямоточного стана, показанной на рис. 3. Якоря двигателей включены параллельно на напряжение генератора $U_{\Gamma}=U_{\alpha}$. Противонапряжения P_i измеряются датчиками D_i . Выходные

напряжения $U_{pi}=k_d P_i$ датчиков сравниваются с напряжениями U_{poi} уставок, определяющими заданные величины противонапряжений P_{0i} . Разностные напряжения $U_{pi}-U_{poi}=k_d \Delta P_i$ подаются на форсирующие звенья ΦZ_i . После форсирующих звеньев включены усилители Y_i , обладающие необходимым усилением по напряжению и мощности. Выходные напряжения усилителей подаются на обмотки возбуждения OB_i двигателей.

Датчики противонапряжения (рис. 4) состоят из двух роликов 3, месдозы 4, воспринимающей усилие P' , пропорциональное противонапряжению P , и корпуса 5. Датчики устанавливаются на стане между барабанами 1 и волокодержателем 2. Два ролика и барабан образуют петлю. Через левый ролик на месдозу передается усилие

$$P' = P \sin \beta,$$

где β — угол между проволокой и осью волок. (При величине $\beta \leq 5-7^\circ$ свойства прямоточного стана не нарушаются.)

Приведенные ранее соотношения позволяют произвести полный расчет параметров системы. Требуемые величины k_i в соответствии с равенствами (5) и (25) обеспечиваются выбором соответствующих значений произведений $k_d k_{\Phi Z_i} k_{Y_i}$ (все эти три коэффициента усиления можно произвольно изменять в широких пределах).

Принятые в статье обозначения (рис. 1):

Ω_i — угловые скорости двигателей;
 Y_i, Y_{i+1} — передаточные функции интегрирующих элементов, соответствующих связи между скоростями двигателей и противонапряжениями;

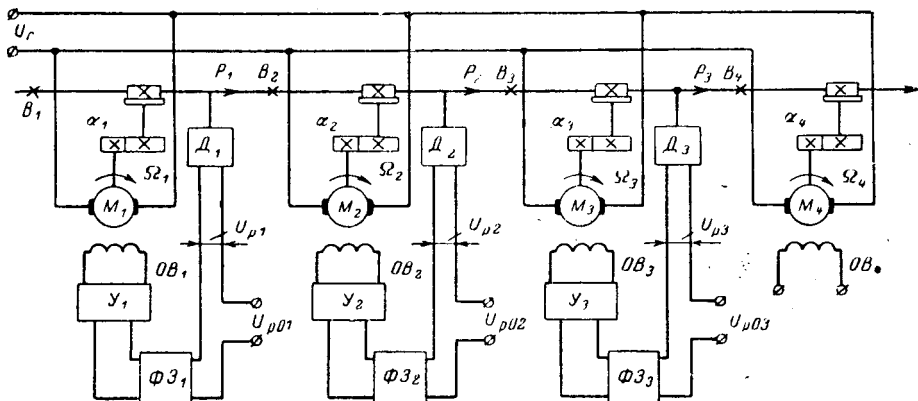


Рис. 3. Принципиальная схема системы управления.

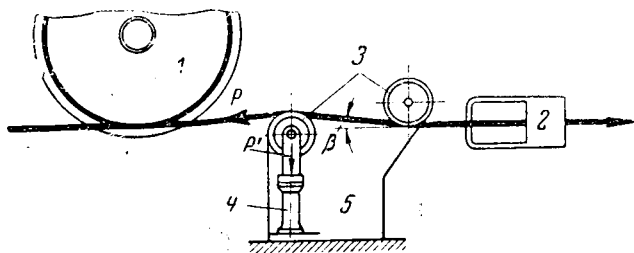


Рис. 4. Кинематическая схема датчика противонапряжения.

 P_i — противонапряжения; k_d — коэффициент преобразования датчиков противонапряжений; $k_d P_{oi}$ — напряжения уставок, пропорциональные заданным величинам противонапряжений P_{oi} ; $\Delta P_i = P_i - P_{oi}$ — отклонения противонапряжений от заданных значений; $U_i = k_d \Delta P_i$ — управляющие напряжения, пропорциональные отклонениям ΔP_i ; $K_{фзi}$ — передаточные функции форсирующих звеньев, применяемых для достижения устойчивости системы и обеспечения надлежащего качества переходных процессов; $W_{вi}$ — передаточные функции двигателей, управляемых со стороны обмотки возбуждения с по-

мощью усилителей мощности, обладающих достаточным быстродействием (например, усилители на управляемых полупроводниковых вентилях);

k_{Ti} — коэффициенты, преобразующие подаваемое на параллельно соединенные якоря двигателей напряжение $U_{я}$ в начальные тяговые усилия T_{Hi} на барабанах двигателей, обеспечивающие разгон стана (усилия T_{Hi} возникают в первый момент после подачи напряжения $U_{я}$, когда скорости вращения двигателей равны нулю);

$W_{дi}$ — передаточные функции двигателей, связывающие их скорости вращения с разностью начального тягового усилия и усилия нагрузки на барабане при постоянном потоке возбуждения;

B_i — давление на волоку в i -ом блоке.

Литература

1. Ганнелъ В. Я., Электропривод волоочильных станов и канатных машин, Металлургиздат, 1962.

2. Гринман И. Г. и Сахипов Н. И., Решение задачи многосвязного регулирования многократных волоочильных станов с помощью многополюсников, «Автоматика и телемеханика», 1963, № 4.

3. Перлин И. Л., Теория волочения, Металлургиздат, 1957.

4. Фельдбаум А. А., Вычислительные устройства в автоматических системах, Физматгиз, 1959.

[30.12.1966]



УДК 621.771.35

Исследование работы бесконтактной системы управления главным приводом блюминга 1300

Канд. техн. наук Б. Р. ГЕНДЕЛЬМАН

ВНИИ Электропривод

В 1964 г. на Криворожском (КМЗ) и Челябинском (ЧМЗ) металлургических заводах введены в действие два сверхмощных блюминга 1300 с индивидуальным приводом валков, спроектированные и изготовленные Уралмашзаводом; технический проект электроприводов и систем автоматики разработал ВНИИ Электропривод.

Блюминги 1300 предназначены для прокатки слитков весом 8—13 т в заготовки сечением 370×370 мм и слэбы высотой 200—250 мм и шириной 700—1100 мм. Производительность блюминга достигает $800 \div 1100$ т/ч. Блюминги 1300 оснащены быстродействующими механизмами и электроприводами с ионными системами управления. Данные электроприводов механизмов приведены в табл. 1.

Высокие интенсивность и производительность работы потребовали установки на главном приводе мощных прокатных двигателей. Выросла электровооруженность главных приводов.

Для сравнения электровооруженности действующих блюмингов с индивидуальным приводом валков в табл. 2 приведены данные машин главных приводов. Из таблицы видно, что электровооруженность главных приводов блюмингов 1300 превышает в 1,5—2 раза электровооруженность блюминга 1150.

В табл. 3 приведены данные прокатных электродвигателей главных приводов блюминга 1300.

Прокатные двигатели питаются от безмаховиковых преобразовательных агрегатов с генераторами постоянного тока. Данные машин агрегатов приведены в табл. 4.

Машины главных приводов возбуждаются от ионных преобразователей, данные которых приведены в табл. 5.

Таблица 1

Наименование механизма	Скорость перемещения	Передаточное число редуктора	Данные приводного электродвигателя	
			Мощность, кВт	Скорость, об/мин
Нажимное устройство	167/220 мм/сек	4,8	2×300	750/1000
Линейки манипуляторов	1,47 м/сек	1	615	35
Рабочие роляганги	2,3 м/сек	4,24	200	500
Станинные и индивидуальные ролики	3,9 м/сек	1	67	205
Контователь	1,7 м/сек	18	200	500
Ножницы	18 ход/мин	1	2500	23

Примечание. Быстродействующие механизмы обеспечивают прокатку с короткими паузами, вследствие этого машинное время главного привода в цикле достигает 60% и более.

Таблица 2

Блюминг	Год ввода в действие	Суммарная мощность прокатных двигателей, кВт	Суммарная мощность питающих генераторов, кВт	Суммарная мощность машин главного привода, кВт	Суммарный момент прокатных двигателей, тм	Тип преобразовательного агрегата
1 150	1954	6 600	7 200	12 700	129	Маховиковый
1 150	1959	9 200	9 860	20 760	129	Безмаховиковый
1 300	1964	13 600	14 400	31 400	220	Безмаховиковый
1 300	1964	13 600	20 000*	41 800*	220	Безмаховиковый

* Установлены четыре генератора, скомбинированные в два преобразовательных агрегата и обеспечивающие при необходимости возможность работы на одном агрегате.

Таблица 3

Блюминг 1300	Тип	Мощность, кВт	Напряжение	Скорость вращения, об/мин	Маховой момент, тм ²	Диаметр якоря, мм
ЧМЗ	МП11000—65	6 800	865	60/90	300	3 400
КМЗ	П24/160—6,8	6 800	830	60/90	300	3 100

Таблица 4

Блюминг 1300	Тип генератора	Номинальная мощность, кВт	Номинальное напряжение, в	Тип синхронного двигателя	Мощность синхронного двигателя, кВт	Скорость вращения, об/мин	Число генераторов	
							В агрегате	Всего
КМЗ	П21—40—17к	5 000	835	МС324—20/12	14 000	500	2	4
ЧМЗ	П18500—375	7 200	830	ДС32121—12	20 000	375	2	2

Таблица 5

Назначение преобразователей	Данные преобразователя		Данные трансформатора			
	Тип	Количество	Тип	Выпрямленное напряжение, в	Выпрямленный ток, а	Количество
Возбуждение генераторов	РМ 200	4	ТНР 420/0,5	500	2×150	2
Возбуждение прокатных двигателей	РМВ 250×6	1	ТНР 1800/10	460	2×500	1

В Советском Союзе уже имеется положительный опыт эксплуатации главных приводов реверсивных станов с ионными системами возбуждения [Л. 1]. Система управления главными приводами блюмингов 1300 в отличие от систем управления действующих блюмингов выполнена бесконтактной и построена на магнитных усилителях 400 гц.

На рис. 1 показана схема управления напряжением генераторов. Обмотка возбуждения каждого генератора (для КМЗ — каждой пары генераторов) питается от автономной реверсивной группы вентилей. Все сигналы суммируются в двухтактном магнитном усилителе УГ, с выхода которого питаются обмотки управления статических фазорегуляторов (ФСВ, ФСН).

Суммирующий усилитель УГ имеет четыре обмотки со следующим назначением: управления (ОУ), положительной обратной связи по напряжению генератора (ОПС), токовую (ОТ) и гибкой связи (ОС). На вход системы управления подается напряжение педального сельсинного командоаппарата (СКА), снимаемое с фазочувствительного устройства. Обмотка управления (ОУ) суммирующего усилителя (УГ) включена на разность напряжений — задающего и обратной связи генератора.

В схеме управления предусмотрена отсечка по напряжению, осуществляемая включением параллельно обмотке управления (ОУ) эталонного потенциометра с сопротивлениями 12С и 13С, питающегося от эталонного напряжения магнитного усилителя УЭГ. Введение эталонного напряжения делает характеристику $F_{OY} = f(U_r)$ нелинейной. Отсечка наступает при напряжении около 85% от номинального.

В режиме разгона вхолостую (с учетом отсечки по току), результирующая н. с. магнитного усилителя УГ

$$F_p = F_y + F_{nc} - F_c, \quad (1)$$

где F_y — н. с. обмотки управления;

F_{nc} — н. с. обмотки положительной связи;

F_c — н. с. обмотки гибкой обратной связи.

Процесс нарастания напряжения генератора определяется тремя режимами:

а) до отсечки по напряжению, для которого

$$F_p = \frac{(U_a - \beta U_r) r_{ш} + U_{ш} r_{п}}{r_y r_{ш} + r_{п} r_{ш} + r_{п} r_y} \omega_y + \frac{\beta U_r}{r_{nc}} \omega_{nc} - k_2 T_{br} p i_r, \quad (2)$$

где

U_a — напряжение задающее;

U_r — напряжение генератора;

$U_{ш}$ — напряжение шунтирующего эталона;

r_y , $r_{п}$ и $r_{ш}$ — сопротивления цепи обмотки управления, последовательное и шунтирующего контура;

r_{nc} — сопротивление цепи обмотки положительной связи;

$$k_2 = \frac{r_{18} r_{19} \omega_c}{r_{ст} (r_{18} + r_{19}) + r_{19} (r_{17} + r_{19})} - \text{коэффициент};$$

i_r — ток возбуждения генератора;

β — коэффициент делителя напряжения;

ω_c , ω_{nc} — число витков обмоток стабилизации и положительной связи;

T_{br} — электромагнитная постоянная времени обмотки возбуждения генератора;

p — оператор;

б) после отсечки по напряжению, для которого результирующая н. с.

$$F_p = \frac{U_a - \beta U_r}{r_y} \omega_y + \frac{\beta U_r}{r_{nc}} \omega_{nc} - k_2 T_{br} p i_r; \quad (3)$$

в) установившийся режим

$$F_p = \frac{U_a - \beta U_r}{r_y} \omega_y + \frac{\beta U_r}{r_{nc}} \omega_{nc}. \quad (4)$$

Регулирование тока возбуждения прокатного двигателя при работе на скорости выше номиналь-

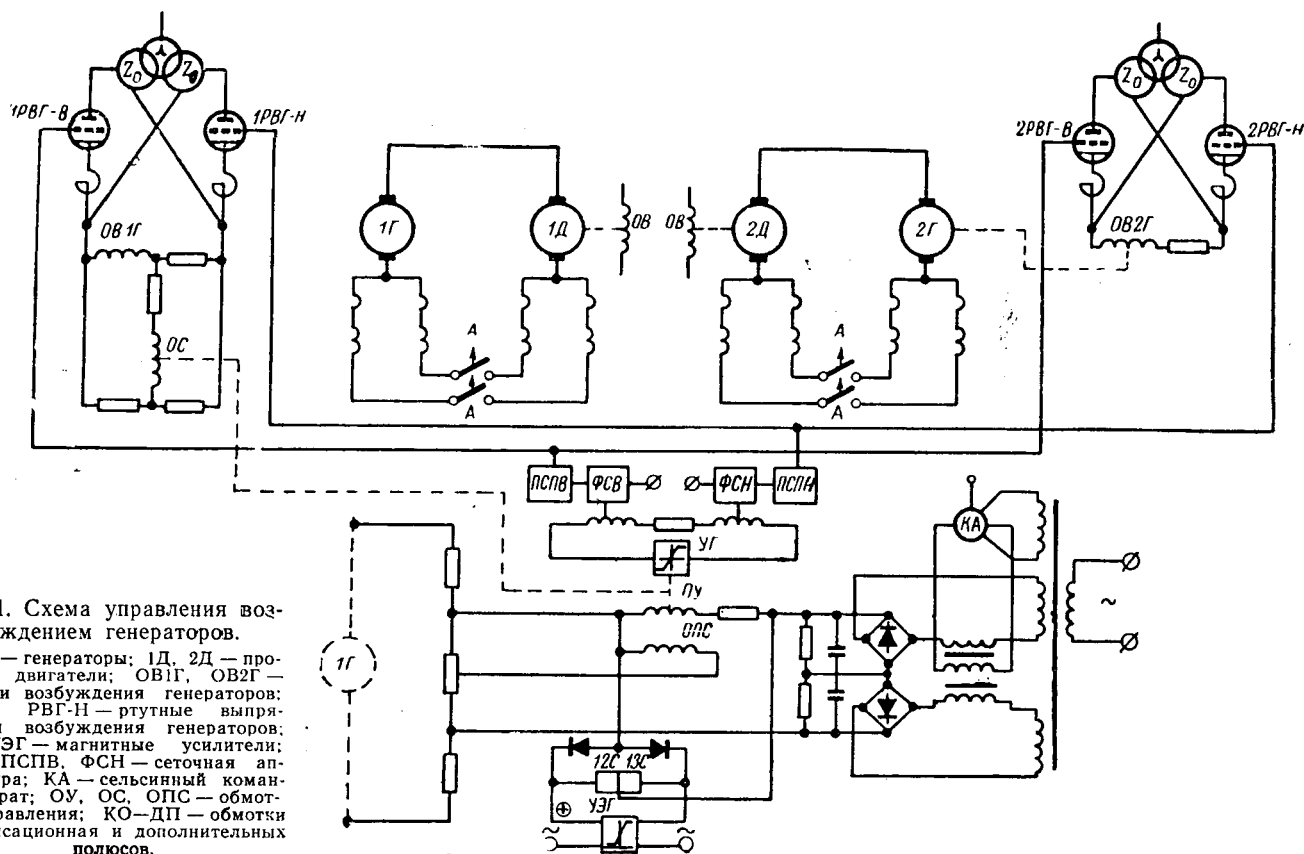


Рис. 1. Схема управления возбуждением генераторов.

1Г, 2Г — генераторы; 1Д, 2Д — прокатные двигатели; ОВ1Г, ОВ2Г — обмотки возбуждения генераторов; РВГ-В, РВГ-Н — ртутные выпрямители возбуждения генераторов; УГ, УЭГ — магнитные усилители; ФСВ, ПСПВ, ФСН — сеточная аппаратура; КА — селсыйный командоаппарат; ОУ, ОС, ОПС — обмотки управления; КО-ДП — обмотки компенсационная и дополнительных полюсов.

ной, выполнено зависимым от напряжения генератора. Схема показана на рис. 2.

Фаза сеточного напряжения ионного преобразователя управляется статическим фазорегулятором ФСД и суммирующим двухтактным магнитным усилителем УД. Обмотка управления усилителя УД включена на разность напряжений — задающего (от усилителя УП) и обратной связи, которое про-

порционально току возбуждения прокатных двигателей (снимается с потенциометра 49С—50С). Параллельно обмотке управления включено напряжение бокового эталона магнитного усилителя УЭД. Таким образом в этой схеме характеристика $F_{oy} = f(I_b)$ — нелинейна. Для оптимизации процессов управления потоком в усилителе УЭД введена положительная обратная связь по току возбуждения.

Магнитный усилитель управления потоком УП полностью открыт до тех пор пока напряжение генераторов не достигнет примерно 95% от номинального значения. На участке 95 ÷ 100% $U_{гн}$ выход усилителя УП изменяется таким образом, что ток возбуждения прокатных двигателей уменьшается, а скорость увеличивается от 60 до 90 об/мин.

Регулирование тока нагрузки и мощности прокатных деталей. Схема регулирования нагрузки показана на рис. 3. Обратные связи по току выполнены с отсечкой. До основной скорости регулятор нагрузки воздействует на уменьшение на-

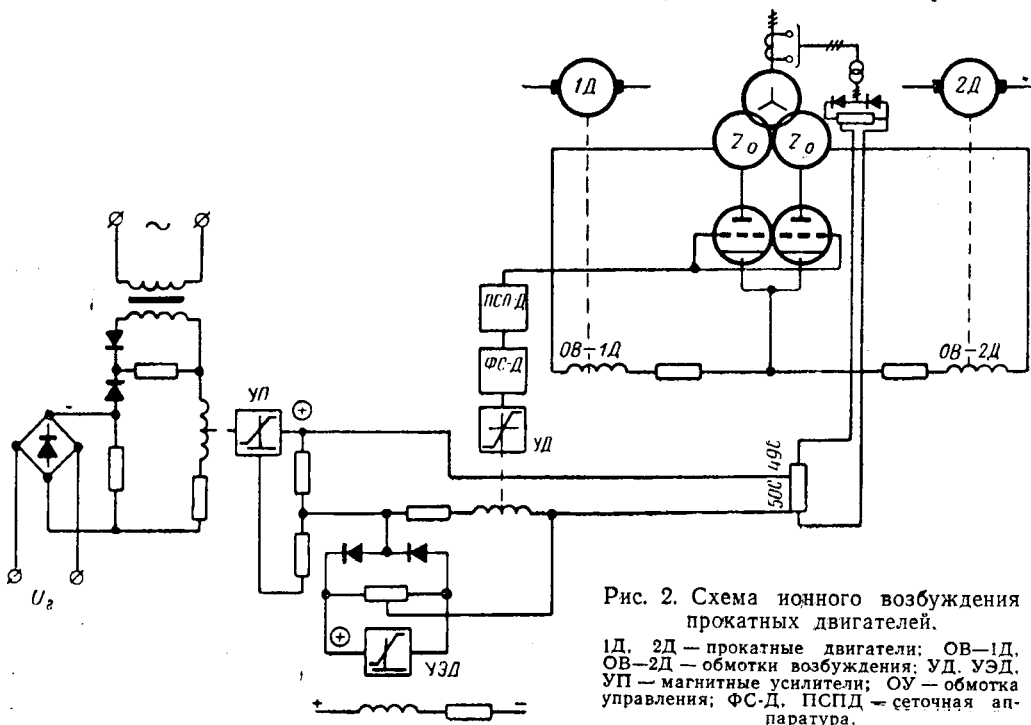
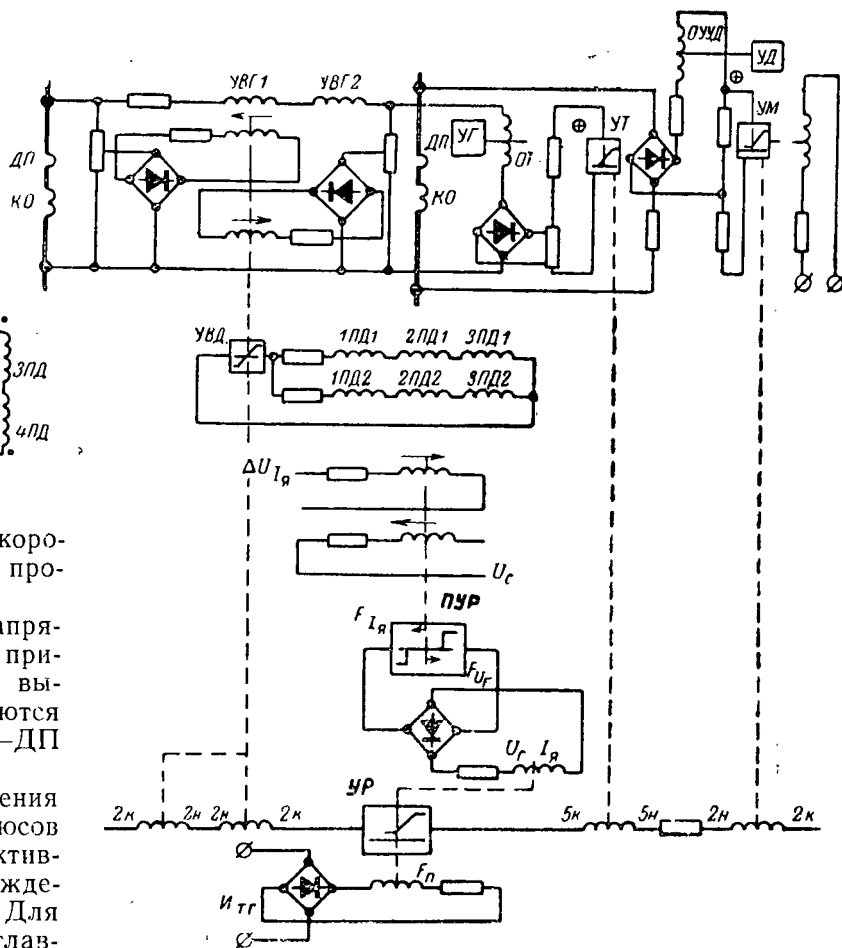
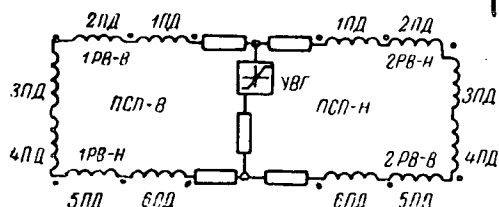


Рис. 2. Схема ионного возбуждения прокатных двигателей.

1Д, 2Д — прокатные двигатели; ОВ-1Д, ОВ-2Д — обмотки возбуждения; УД, УЭД — магнитные усилители; ОУ — обмотка управления; ФСД, ПСПД — сеточная аппаратура.

Рис. 3. Схема регулирования нагрузки.

УВГ, УВД — усилители выравнивания нагрузок; ПУР, УР — усилители рекуперации; ПД+6ПД — пик-дрессели фазорегуляторов; УТ, УМ — усилители регулирования тока нагрузки и мощности.



пряжения генераторов, выше основной скорости — на увеличение тока возбуждения прокатных двигателей.

В качестве источников эталонного напряжения регуляторов нагрузки и мощности применены магнитные усилители УТ и УМ, выходные напряжения которых сравниваются с падением напряжения в обмотках КО—ДП прокатных двигателей.

Обратная связь по току взята от падения напряжения в обмотках добавочных полюсов (ДП) и компенсационной (КО). Индуктивность этих обмоток дает некоторое упреждение действия регулятора нагрузки. Для исключения влияния производной тока главной цепи на работу регулятора намечено осуществить обратную связь от напряжения, снимаемого с сопротивления, включенного последовательно в цепь индуктивного шунта (ИШ).

В этом случае падение напряжения на сопротивлении и является аналогом тока главной цепи.

Выходное напряжение усилителя мощности УМ уменьшается по мере уменьшения тока возбуждения прокатных двигателей. Это обеспечивается обмоткой положительной обратной связи, включенной на падение напряжения в сопротивлении потенциометра цепи возбуждения (49С—50С). Таким образом, достигается уменьшение уставки ограничения максимального тока якоря на скоростях выше номинальной.

Напряжение генераторов и потоки прокатных двигателей в режиме выравнивания нагрузок регулируются воздействием на обмотки управления пик-дресселей фазорегуляторов ФС-В, ФСН и ФС-Д с помощью соответствующих магнитных усилителей выравнивания нагрузок УВГ и УВД [Л. 1].

Регулирование тока рекуперации. В режиме рекуперативного торможения должны быть исключены из работы регулятор мощности (усилитель УМ) и узлы схемы регулятора выравнивания, нагрузок, воздействующие на увеличение потока прокатных двигателей.

Для этого в схеме применен индикатор рекуперации [Л. 2], состоящий из промежуточного двухтактного релейного магнитного усилителя ПУР и усилителя рекуперации УР.

В промежуточном усилителе ПУР суммируются два сигнала, пропорциональные напряжению и току якоря. В двигательном режиме эти сигналы направлены встречно и ПУР закрыт; в режиме рекуперации сигналы складываются и усилитель ПУР

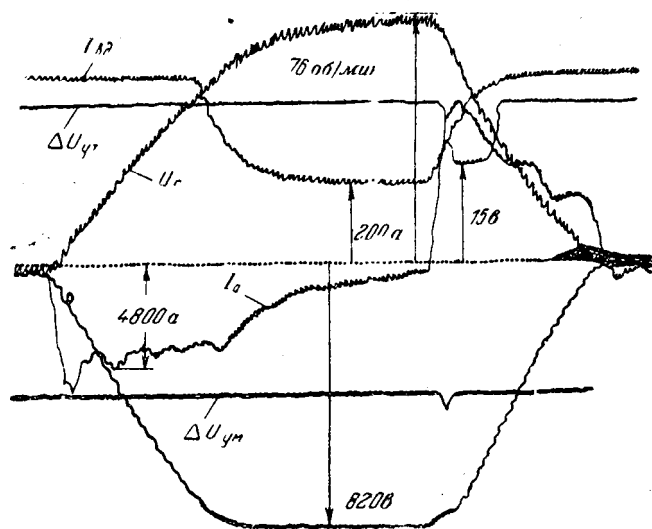


Рис. 4. Осциллограмма работы главного привода блюминга 1300.

$U_{я}$, $I_{я}$, n — напряжение, ток и скорость прокатного двигателя; $\Delta U_{ут}$, $\Delta U_{ум}$ — падения напряжения в сопротивлениях потенциометров усилителей УТ и УМ (в усилителе УМ обмотка отключена).

открывается. Двухтактный выходной сигнал усилителя ПУР, преобразованный с помощью выпрямительного моста в одноктактный, передается в усилитель УР в качестве ждущего сигнала. Усилитель УР открывается только при скорости выше номинальной. В этом случае суммируются два сигнала: ждущий (от усилителя ПУР) и пропорциональный скорости, взятый от напряжения тахогенератора прокатного двигателя.

От выходного сигнала усилителя УР через соответствующие обмотки управления повышается уставка тока усилителя УМ и уменьшается уставка тока усилителя УТ. Этим самым уменьшается уставка максимального тока главной цепи при рекуперативном торможении.

На осциллограмме главного привода блюминга 1300 (рис. 4) показана кривая измененной уставки усилителя УТ в режиме торможения. На осциллограммах рис. 6, а и б показан ток главной цепи в режиме реверса и торможения при работе индикатора рекуперации (рис. 6, а) и при его исключении (рис. 6, б). Как следует из осциллограммы, при введении в действие индикатора рекуперации ток при торможении уменьшается с 9 300 до 7 500 а.

Переходные процессы. Как указывалось выше, в схеме управления напряжением генератора вве-

дена отсечка. На первом участке разгона (до отсечки) н. с. обмотки управления уменьшается с ростом напряжения генератора, так как шунтирующая цепь обладает конечной мощностью, а напряжение βU_r осуществляет обратную связь. Для поддержания форсировки введена положительная обратная связь по напряжению генератора.

Для упрощения анализа переходных процессов на первом участке разгона принимаем н. с. обмотки управления постоянной, а н. с. обмотки положительной обратной связи изменяющейся прямо пропорционально напряжению генератора.

Коэффициент положительной обратной связи по напряжению определяется с учетом уменьшения н. с. обмотки управления по статической характеристике. Структурная схема САУ показана на рис. 5, а.

Передаточные функции САУ до момента отсечки по напряжению (система разомкнута) описываются следующими уравнениями (статический ток холостого хода принят равным нулю):

для напряжения генератора

$$W_{(p)} U_r = \frac{k_1}{(1 + T_{\Phi p})(1 + T_{\text{вг}p}) + k_2 T_{\text{вг}p} + k_3}; \quad (5)$$

для скорости прокатного двигателя

$$W_{(p)} \omega = \frac{k_1 k_n k_m}{[(T_{\Phi p} + 1)(T_{\text{вг}p} + 1) + k_2 T_{\text{вг}p} + k_3][p(T_{\text{н}p} + 1) + k_n k_E k_m]}, \quad (6)$$

где

$$k_1 = k_{yr} k_{\Phi p} k_{pв} k_{вг} k_{г};$$

$$k_2 = k_{yr} k_{\Phi p} k_{pв} k_{вг} k_{ст};$$

$$k_3 = k_{yr} k_{\Phi p} k_{pв} k_{вг} k_{г} k_{ос}.$$

Данные параметров САУ напряжения главного привода блюминга 1300 КМЗ при работе от одного преобразовательного агрегата приведены в табл. 6.

После подстановки данных в уравнения (5) и (6) получим передаточные функции для напряжения и скорости

до отсечки

$$W_{(p)} U_r = \frac{15250}{0,165p^2 + 23p - 5,1}; \quad (7)$$

$$W_{(p)} \omega = \frac{19800}{0,064p^4 + 9,96p^3 + 0,164p^2 + 3856p - 862}; \quad (8)$$

после отсечки

$$W_{(p)} U_r = \frac{7500}{0,095p^2 + 13,25p + 115}; \quad (9)$$

$$W_{(p)} \omega = \frac{9750}{0,037p^4 + 5,74p^3 + 141p^2 + 2930p + 19430}. \quad (10)$$

Учитывая вычисленные корни и начальные условия (для второго участка разгона) и пользуясь теоремой разложения операционного исчисления

$$f(t) = \frac{A_0}{B_0} + \sum_{i=1}^n \left[\frac{M(p_i)}{pN'(p_i)} \right] e^{p_i t}, \quad (11)$$

получены уравнения для напряжения, скорости и тока якоря прокатного двигателя:

до отсечки (корнем — 139 ввиду его большой величины пренебрегаем)

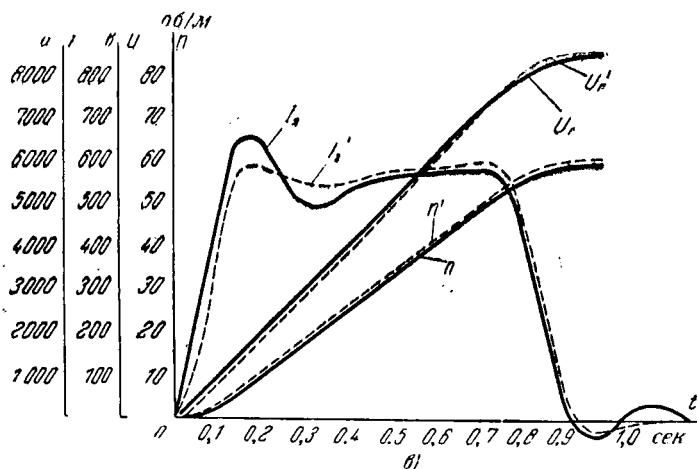
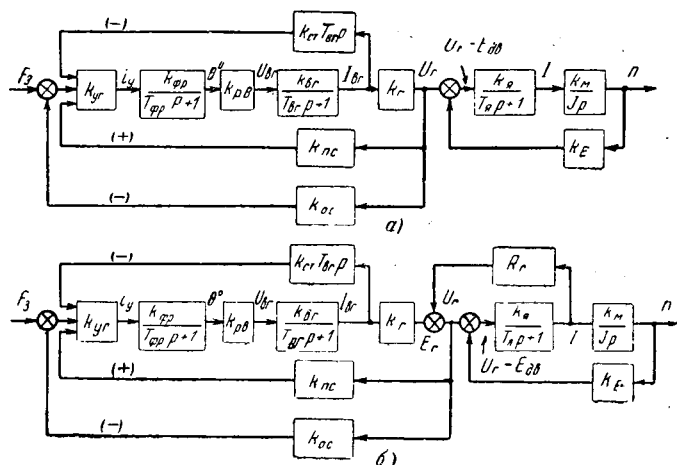


Рис. 5. Структурные схемы САУ и расчетные осциллограммы в режиме разгона.

а — структурная схема без учета падения напряжения в якоре генератора; б — то же, но с учетом падения напряжения в якоре генератора; а — расчетные осциллограммы.

U_r, I_a, n — напряжение, ток и скорость без учета падения напряжения в якоре генератора; U', I', n' — то же, но с учетом этого напряжения.

Таблица 6

Режим работы	k_{yr}	$k_{\Phi p} \times k_{r, \Phi}$	$k_{\Phi r}, a/b$	$k_{r'}, b/a$	$k_{\Phi'}, a/b$	$k_{e'}, a \cdot \text{сек}$	$k_{m'}, \text{нм/а}$	$J, \text{нмсек}^2$	$T_{\Phi p}, \text{сек}$	$T_{\Phi r}, \text{сек}$	$T_{\Phi'}, \text{сек}$	$k_{\text{ст}}$	$k_{oc}, a/b$	k_1	k_2	k_3
До отсечки	0,038	19 000	3,06	6,9	150	130	130	90,10 ³	0,05	3,3	0,065	0,27 · 10 ⁻²	0,4 · 10 ⁻³	15 250	5,25	6,1
После отсечки	0,038	19 000	3,06	3,4*	150	130	130	90,10 ³	0,05	1,9*	0,065	0,27 · 10 ⁻²	1,52 · 10 ⁻²	7 500	5,25	1,4

* Учтена нелинейность кривой холостого хода генератора.

$$U_r = -2990 + 2990e^{0,221t}; \quad (12)$$

$$\omega = -23 + 22,75e^{0,221t} + 0,29e^{-7,7t} \cos(0,658 + 19,34t); \quad (13)$$

$$I = 3840e^{0,221t} + 4060e^{-7,7t} \cos(0,658 + 19,34t); \quad (14)$$

после отсечки (корнем—130 пренебрегаем)

$$U_r = 831 - 64,3e^{-9,3t} \quad (15)$$

$$\omega = 6,2 - 0,313e^{-9,3t} + 0,22e^{-7,7t} \cos(3,27 + 19,34t) \quad (16)$$

$$I = 2015e^{-9,3t} + 3025e^{-7,7t} \cos(5,22 + 19,34t). \quad (17)$$

По этим уравнениям на рис. 5,в построены расчетные кривые тока, скорости и напряжения прокатного двигателя при разгоне до номинальной скорости.

Уравнения (12)–(17) получены при условии, что обратная связь (положительная и отрицательная) по напряжению генератора принята без учета внутреннего падения напряжения в якоре генератора, т. е. $U_r = E_r$.

Структурная схема САР с учетом падения напряжения в якоре генератора представлена на рис. 5,б.

Для этого случая передаточные функции САР выражаются следующими уравнениями:

$$W_{(p)U_r} = \frac{5948p^2 + 91500p + 258 \cdot 10^4}{0,064p^4 + 10,4p^3 + 226p^2 + 3859p - 862}; \quad (18)$$

$$W_{(p)\omega} = \frac{19800}{0,064p^4 + 10,4p^3 + 226p^2 + 3859p - 862}; \quad (19)$$

после отсечки

$$W_{(p)U_r} = \frac{2925p^2 + 45,10^3p + 1,27 \cdot 10^4}{0,037p^4 + 6p^3 + 177p^2 + 2933p + 19430}; \quad (20)$$

$$W_{(p)\omega} = \frac{9750}{0,037p^4 + 6p^3 + 177p^2 + 2933p + 19430}. \quad (21)$$

После нахождения корней и учета всех параметров системы получены уравнения для тока, напряжения и скорости в двух режимах:

до отсечки

$$U_r = -2990 + 2970e^{0,221t} + 12,5e^{-11,2t} \cos(0,666 + 17,8t); \quad (22)$$

$$\omega = -23 + 22,7e^{0,221t} + 0,31e^{-11,2t} \cos(0,34 + 17,8t); \quad (23)$$

$$I = 3480e^{0,221t} + 4510e^{-11,2t} \cos(2,47 + 17,8t); \quad (24)$$

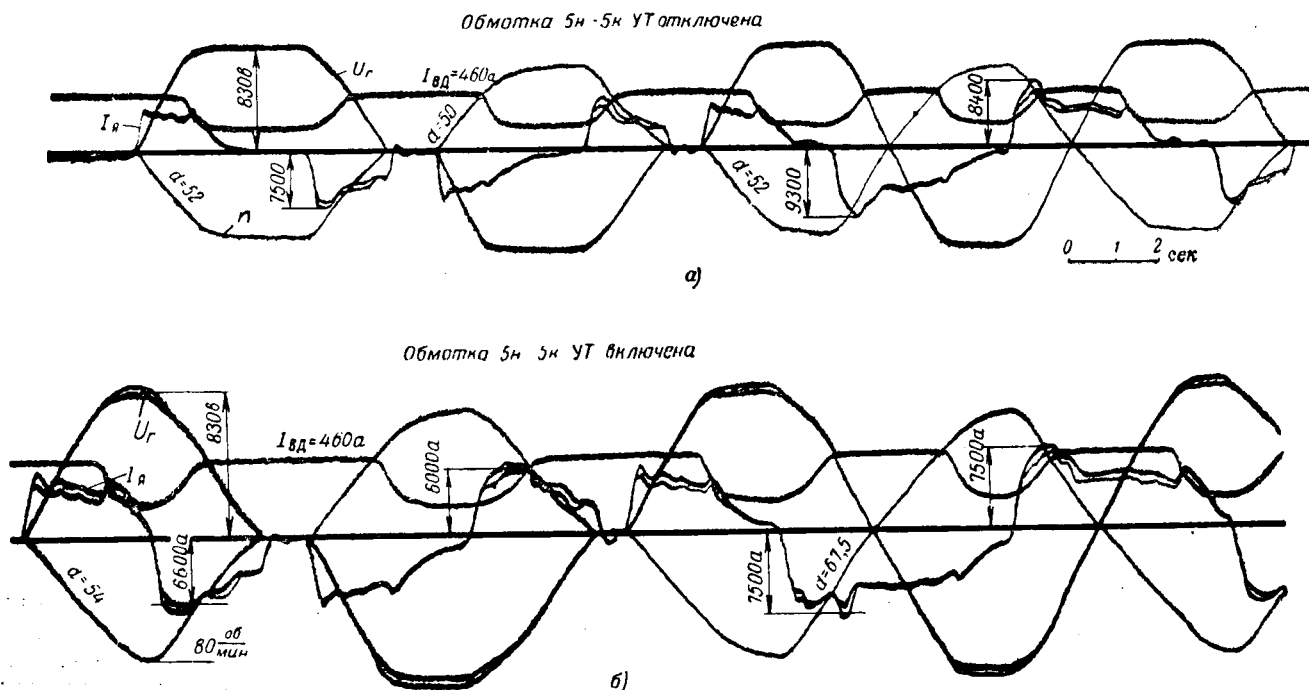


Рис. 6. Осциллограмма работы главного привода блюминга 1300.

а — действие регулятора рекуперации в усилителе УТ исключено; б — действие регулятора рекуперации в усилителе УТ введено.

после отсечки

$$U_r = 825 - 22e^{-12,1t} - 43e^{-10,2t} \cos(0,12 + 15,3t); \quad (25)$$

$$\omega = 6,02 - 0,165e^{-12,1t} - 0,34e^{-10,2t} \cos(0,102 + 15,3t); \quad (26)$$

$$I = 1385e^{-12,1t} - 4330e^{-10,2t} \cos(2,26 + 15,3t). \quad (27)$$

По этим данным на рис. 5,в построены расчетные осциллограммы тока напряжения и скорости.

Сравнение расчетных осциллограмм (рис. 5,в) показывает, что для качественной оценки системы управления главным приводом вполне достаточно ограничиться условием $U_r = E_r$. При этом расчет переходных процессов значительно упрощается.

На рис. 6,а и б показаны осциллограммы тока якоря, напряжения и скорости в режимах пуска, торможения и реверса в диапазоне скоростей ± 90 об/мин, снятые на главном приводе блюминга 1300 КМЗ при работе на одном преобразовательном агрегате¹.

¹ В наладке и экспериментах участвовали В. Г. Титов, Д. А. Жир, Л. Г. Кушнир и М. Г. Бойко.

Из осциллограммы видно, что напряжение и скорость растут линейно при хорошем заполнении графика тока. В режиме разгона до основной скорости расчетные и экспериментальные осциллограммы совпадают.

Вывод. Бесконтактная система управления главным приводом блюмингов 1300 с ионным возбуждением обеспечивает быстроедействие и надежную работу. В системе управления предусмотрены все элементы и подобраны параметры, обеспечивающие работу с ускорениями от 50 до 90 об/мин за 1 сек. Машины главных приводов имеют достаточный запас мощности и момента для обеспечения высокой производительности.

Литература

1. Пистрак М. Я. и Балабуев Л. М., Системы ионного возбуждения главного привода блюмингов, сб. «Труды научно-исследовательского института электропромышленности», 1959, т. 5.

2. Гендельман Б. Р., Бесконтактное устройство для регулирования нагрузки электродвигателя главного привода реверсивного прокатного стана, Авторское свидетельство № 159215 от 2 августа 1962 г., бюллетень № 24 от 7 декабря 1963 г.

[28.4.1967]



УДК 623.313.333.325.3:621.3.016.352

Формирование пусковых процессов асинхронных двигателей включением сопротивлений в цепь статора

Л. П. ПЕТРОВ и В. А. ЛАДЕНЗОН

Одесса

Коммутация статорных цепей асинхронного двигателя, приводящая к изменению запаса энергии магнитного поля, сопровождается возникновением значительных электромагнитных переходных моментов, действие которых в зависимости от величины момента инерции приводного механизма и жесткости его кинематической цепи проявляется по-разному: в малоинерционных приводах переходные моменты вызывают неравномерность разгонов и торможений, а также нестабильность отработки командных импульсов, а в приводах с большими моментами инерции создаются удары и механические перенапряжения в отдельных звеньях механизмов, что приводит к их преждевременному износу и разрушению.

Поэтому в технике асинхронного автоматизированного привода часто возникает задача ограничения величины переходных моментов, либо даже полного их подавления, причем иногда при этом необходимо сохранить быстроедействие привода. В последнем случае правильнее говорить не об ограничении переходных моментов, а о таком формировании переходного процесса, при котором сглаживаются знакопеременные переходные электромагнитные моменты без уменьшения величины среднего действующего момента двигателя. Такое фор-

мирование переходных процессов представляется особенно актуальным в связи с расширяющимся применением асинхронных короткозамкнутых двигателей в приводах с большой частотой пусков [Л. 1].

В практике асинхронного привода для ограничения пусковых токов и соответствующего снижения пускового момента короткозамкнутых двигателей обычно включают в цепь статора активные либо индуктивные сопротивления. Однако такой способ ограничения пускового момента не определяет пропорционального уменьшения величины переходных моментов, поэтому влияние на переходные процессы включенных в цепь статора сопротивлений, называемых в дальнейшем предвключенными, нельзя оценить по степени деформации статической механической характеристики.

Для оценки влияния предвключенных сопротивлений на переходные процессы необходимо решить систему дифференциальных уравнений, описывающих движение электромеханической системы, которую представляет собой привод с асинхронным короткозамкнутым двигателем. С учетом общепринятых допущений соответствующие уравнения, записанные в относительных единицах и в системе координат, вращающейся со скоростью поля ω_0 ,

могут быть представлены в таком виде

$$\left. \begin{aligned} \dot{u}_s &= r_s i_s + \frac{d\dot{\psi}_s}{d\tau} + j\dot{\psi}_s + \dot{u}_v; \\ 0 &= r_r i_r + \frac{d\dot{\psi}_r}{d\tau} + j(\dot{\psi}_r - \omega \dot{\psi}_s); \\ J \frac{d\omega}{d\tau} &= \frac{3U_r I_n p^2}{\omega_0^3} \operatorname{Im}(\dot{\psi}_s^* i_s); \\ \dot{\psi}_s &= x_s i_s + x_m i_r; \\ \dot{\psi}_r &= x_m i_s + x_r i_r. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Наиболее рациональным путем решения такой системы нелинейных дифференциальных уравнений является их моделирование. Для этого уравнения (1) преобразуются так, чтобы они содержали только независимые переменные, обеспечивали устойчивость модели, а число варьируемых коэффициентов преобразованных уравнений для уменьшения ошибки было минимальным.

Уравнения, в которых в качестве независимых переменных выбраны величины i_s и ψ_s наиболее полно удовлетворяют этим требованиям и имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\dot{\psi}_s}{d\tau} &= \dot{u}_s - r_s i_s - j\dot{\psi}_s - \dot{u}_v; \\ \frac{di_s}{d\tau} &= -(\alpha'_s + \alpha'_r) i_s + \frac{\alpha'_r}{x_s} \dot{\psi}_s + \\ &+ \frac{1}{\sigma x_s} (\dot{u}_s - \dot{u}_v) - j i_s - j\omega \left(\frac{1}{\sigma x_s} \dot{\psi}_s - i_s \right); \\ \frac{d\omega}{d\tau} &= \frac{3U_r I_n p^2}{\omega_0^3 J} \operatorname{Im}(\dot{\psi}_s^* i_s). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Системы уравнений (1) и (2) отличаются от принятых в литературе [Л. 2] уравнений асинхронного двигателя только членами, учитывающими падение напряжения на предвключенных сопротивлениях. В наиболее простых случаях, когда предвключенные сопротивления линейны и по характеру своему соответствуют сопротивлениям схемы замещения асинхронного двигателя (активное сопротивление, линейная индуктивность) расчет можно выполнить по уравнениям (2), полагая $\dot{u}_v = 0$ и отнеся предвключенные сопротивления к параметрам двигателя. Однако такой способ решения, хотя он и получил наибольшее распространение, обладает ограниченными возможностями и в большинстве случаев неудобен.

Действительно, если предвключенное активное сопротивление обозначить, как приращение сопротивления первичной цепи Δr_s , а предвключенную индуктивность, как Δx_s , то уравнения электромагнитной части системы привода приобретут следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\dot{\psi}_s}{d\tau} &= \dot{u}_s - (r_s + \Delta r_s) i_s - j\dot{\psi}_s; \\ \frac{di_s}{d\tau} &= - \left[\frac{r_s + \Delta r_s}{(\sigma + \Delta\sigma)(x_s + \Delta x_s)} + \frac{r_r}{(\sigma + \Delta\sigma)x_r} \right] i_s + \\ &+ \frac{r_r}{(\sigma + \Delta\sigma)x_r(x_s + \Delta x_s)} \dot{\psi}_s + \\ &+ \frac{1}{(\sigma + \Delta\sigma)(x_s + \Delta x_s)} \dot{u}_s - \\ &- j i_s - j\omega \left[\frac{1}{(\sigma + \Delta\sigma)(x_s + \Delta x_s)} \dot{\psi}_s - i_s \right]. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Даже в простейшем случае исследования влияния предвключенных индуктивных сопротивлений выражение (3) неудобно, потому что для каждого нового значения индуктивности необходимо рассчитывать и устанавливать 8 коэффициентов. Предвключенная индуктивность составляет обычно несколько процентов сопротивления x_s и поэтому велика вероятность значительных погрешностей при расчете. В тех случаях, когда предвключенные сопротивления нелинейны или по своему характеру не соответствуют сопротивлениям схемы замещения двигателя (например, предвключенная емкость) расчетная схема при $u_v = 0$ вообще непригодна.

Более универсальной и удобной для расчета на электронных моделях является система (2), дополненная уравнениями падений напряжений на предвключенных сопротивлениях:

$$\dot{u}_v = \dot{u}_r + \dot{u}_l + \dot{u}_c. \quad (4)$$

Преимущество такого способа учета влияния предвключенных сопротивлений состоит в том, что модель самого двигателя во всех случаях остается неизменной, а варьируются только коэффициенты в уравнениях падений напряжений. Масштаб падений напряжений можно всегда выбрать так, чтобы свести к минимуму погрешность при установке коэффициентов и таким образом повысить точность расчета. Этот способ применим не только в тех случаях, когда двигатель представлен простой линейной моделью, но и для сложных моделей двигателя, например, с учетом насыщения или с учетом вытеснения тока в роторе.

Выражения для определения падений напряжений на предвключенных сопротивлениях различного характера можно получить путем применения общих приемов преобразования уравнений напряжений к системе координат, вращающейся со скоростью поля. Так, падение напряжения на активном сопротивлении можно выразить следующим образом

$$\dot{u}_r e^{j\tau} = r_v i_s e^{j\tau}$$

или после преобразования

$$\dot{u}_r = r_v i_s. \quad (5)$$

Падение напряжений на линейном индуктивном сопротивлении будет равно:

$$\begin{aligned} \dot{u}_l e^{j\tau} &= x_l \frac{d}{d\tau} [i_s \cdot e^{j\tau}] = \\ &= \left(x_l \frac{di_s}{d\tau} + j x_l i_s \right) e^{j\tau}. \end{aligned}$$

После преобразования этого выражения получим:

$$\dot{u}_l = x_l \frac{di_s}{d\tau} + j x_l i_s. \quad (6)$$

Падение напряжения на нелинейной индуктивности равняется:

$$\dot{u}_l = \chi(i) \frac{di_s}{d\tau} + j x_l(i) i_s, \quad (7)$$

где

$$\chi(i) = \frac{d[x_l(i) \cdot i_s]}{di_s}.$$

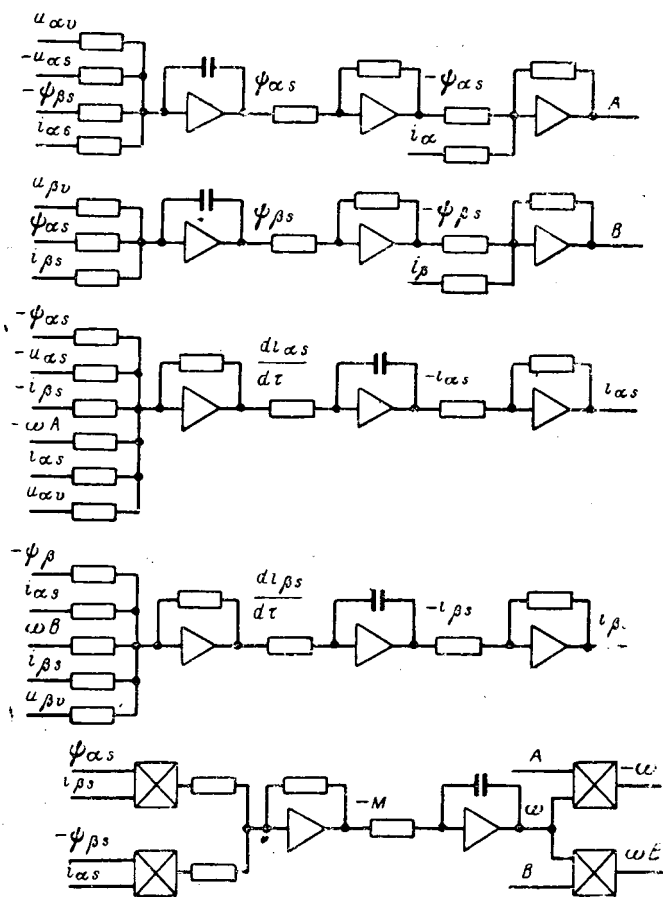


Рис. 1. Структурная схема модели для решения системы уравнений (2).

Падение напряжений на предвключенной емкости вычисляется по такой формуле:

$$\dot{u}_C e^{j\tau} = \frac{1}{\omega_0 C} \int i_s e^{j\tau} d\tau$$

или

$$\left(\frac{d\dot{u}_C}{d\tau} + j\dot{u}_C \right) e^{j\tau} = x_C i_s e^{j\tau},$$

преобразовав это выражение, получим:

$$\frac{d\dot{u}_C}{d\tau} = x_C i_s - j\dot{u}_C. \quad (8)$$

В случае линейных предвключенных сопротивлений уравнения падений напряжений на них (5), (6) и (8), записанные в составляющих по вещественной и мнимой \$\beta\$ осям, имеют такой вид:

$$\left. \begin{aligned} u_{\alpha v} &= x_l \frac{di_{\alpha s}}{d\tau} + r_v i_{\alpha s} - x_l i_{\beta s} + u_{\alpha c}; \\ u_{\beta v} &= x_l \frac{di_{\beta s}}{d\tau} + r_v i_{\beta s} + x_l i_{\alpha s} + u_{\beta c}; \\ \frac{du_{\alpha c}}{d\tau} &= x_C i_{\alpha s} + u_{\beta c}; \\ \frac{du_{\beta c}}{d\tau} &= x_C i_{\beta s} - u_{\alpha c}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Для совместного решения уравнений (2) и (9) используются электронные модели со структурными схемами, изображенными на рис. 1 и 2.

Решения этих уравнений относительно электромагнитного момента заторможенного двигателя, представленные осциллограммами на рис. 3, дают наглядное представление о влиянии различных по характеру предвключенных сопротивлений одинаковой величины на переходные процессы.

Оценка влияния характера сопротивления на переходный процесс производится по отношению максимального \$M_{\max}\$ и минимального \$M_{\min}\$ значений переходного момента к пусковому. Величина предвключенного сопротивления при таком сравнении принципиального значения не имеет. Результаты сравнения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Способ пуска	Кратность моментов		
	$\frac{M_{\max}}{M_n}$	$\frac{M_{\min}}{M_n}$	$\frac{M_{\max} - M_{\min}}{M_n}$
Прямой (рис. 3,а)	2,2	-0,165	2,365
Через индуктивность (рис. 3,б)	2,5	-0,4	2,9
Через активное сопротивление (рис. 3,в)	2,05	0	2,05
Через емкость (рис. 3,г)	1,5	0,88	0,62

Анализ осциллограмм, изображенных на рис. 3, показывает, что при пуске двигателя с предвключенной емкостью относительное значение периодической составляющей переходного момента минимально. Следовательно, предвключенная емкость как средство ограничения переходного момента наиболее эффективна. Предвключенная индуктивность не способствует подавлению периодической составляющей переходного момента, поэтому для ограничения пусковых токов асинхронных короткозамкнутых двигателей во всех случаях предпочтительнее использовать активные сопротивления¹.

Предвключенные индуктивности и активное сопротивление уменьшают среднее значение момента

¹ Не следует смешивать пуск двигателя через линейную индуктивность с пуском через магнитный усилитель. В последнем случае переходные моменты ограничиваются скоростью изменения поведенного к двигателю напряжения.

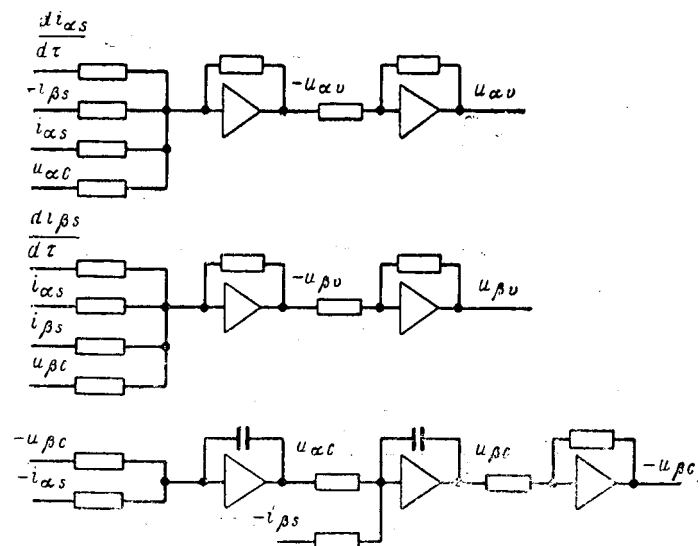


Рис. 2. Структурная схема модели для решения системы уравнений (9).

в переходном процессе. Следовательно, для формирования переходных процессов с одновременным сохранением быстродействия привода следует применять активно-емкостные предвключенные сопротивления.

Это положение подтверждается осциллограммой переходного момента, приведенной на рис. 4, полученной при прежней величине предвключенной емкости ($x_c = 7 \text{ ом}$) и таком добавочном сопротивлении, при котором напряжение на зажимах двигателя остается равным напряжению сети.

Величину активного сопротивления при известной емкости можно вычислить по следующему выражению:

$$r_v = \sqrt{r_k^2 + 2x_k x_c - x_c^2} - r_k, \quad (10)$$

где r_k и x_k — активное и индуктивное сопротивление заторможенного двигателя (короткого замыкания).

Сравнение осциллограмм, изображенных на рис. 4 и рис. 3,а, показывает, что в последнем случае ударное значение пускового момента уменьшилось в 1,4 раза, а установившееся его значение осталось таким же, как и при прямом пуске.

Необходимо, однако, учитывать, что при работе асинхронного двигателя с последовательно включенными конденсаторами возможен автоколебательный режим в связи с самовозбуждением машины. Поэтому конденсаторы должны выбираться так, чтобы самовозбуждение не развивалось. Задача выбора величины емкости таких конденсаторов пока не имеет аналитического решения, так как расчетные зависимости, полученные из анализа режима самовозбуждения [Л. 3], не учитывают динамических свойств электромеханической системы и не отражают влияния момента инерции привода [Л. 4].

При известных параметрах привода расчет величины предвключенной емкости может производиться по следующему методу. Поскольку режим самовозбуждения исключается условиями задачи, то для ее решения нет надобности учитывать нелинейность кривой намагничивания. Нелинейностью индуктивных сопротивлений рассеяния в данном

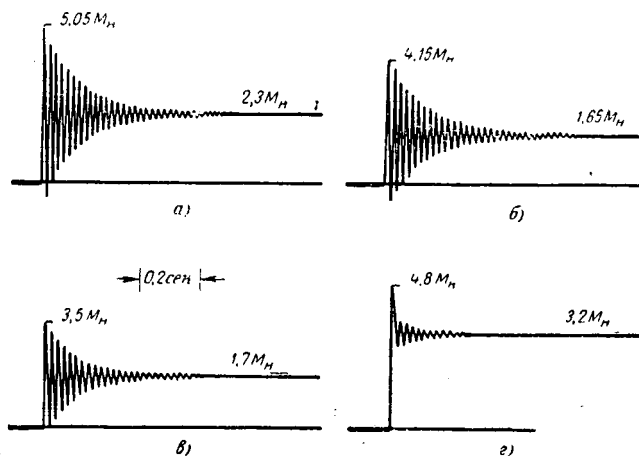
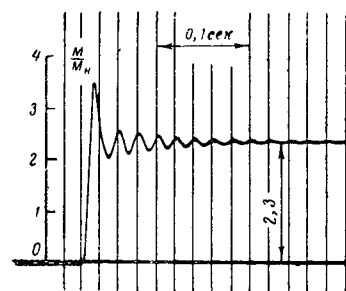


Рис. 3. Расчетные осциллограммы момента двигателя АО-31-4 при прямом пуске (а) и пуске с предвключенными индуктивным (б), активным (в) и емкостным (г) сопротивлениями величиной 7 ом.

Рис. 4. Расчетная осциллограмма момента двигателя АО-31-4 при подключении к сети через активно-емкостное сопротивление: $x_c = 7 \text{ ом}$ и $r_v = 5,8 \text{ ом}$.



случае пренебрегать нельзя потому, что интенсивность разгона двигателя определяется насыщенными значениями этих сопротивлений x_{kN} , а условия устойчивой работы вблизи синхронной скорости ненасыщенными x_k . Для учета нелинейности сопротивлений рассеяния изменяющаяся часть сопротивления x_k представляется как нелинейное предвключенное сопротивление $x_l(i)$:

$$x_l(i) = k[x_k(i) - x_{kN}]. \quad (11)$$

Очевидно, при $k=0,5$ изменяющаяся часть сопротивления x'_2 не учитывается, а при $k=1$ вся изменяющаяся часть этого сопротивления будет вынесена в первичную цепь. Многократные решения этой задачи с учетом нелинейности x_k показывают, что наилучшее совпадение с экспериментом получается при значениях коэффициента $k=0,7-0,8$.

Падения напряжений на сопротивлениях $x_l(i)$ и x_c определяются по уравнениям (7) и (8) и для моделирования могут быть представлены в таком виде:

$$\left. \begin{aligned} u_{av} &= \chi(i) \frac{di_{as}}{d\tau} - x_l(i) i_{ps} + u_{ac}; \\ u_{pv} &= \chi(i) \frac{di_{ps}}{d\tau} + x_l(i) i_{as} + u_{pc}; \\ \frac{du_{ac}}{d\tau} &= x_c i_{as} + u_{pc}; \\ \frac{du_{pc}}{d\tau} &= x_c i_{ps} - u_{ac}. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Структурная схема модели для совместного решения уравнений (12) и (2) приведена на рис. 5. Осциллограммы момента и скорости при пуске двигателя через предвключенную емкость и осциллограммы решения уравнений на модели, представленные на рис. 6, показывают, что при таком включении не только увеличивается среднее значение пускового момента, но и, благодаря эффективному ограничению переходного момента, повышается плавность пуска.

Если предвключенные конденсаторы выбраны так, что номинальная скорость двигателя находится вблизи зоны асинхронного самовозбуждения, то при пуске с малой нагрузкой значительно увеличивается перерегулирование при скорости, близкой к установившейся. Однако периодическая составляющая момента в этой зоне невелика. Рассмотренный способ расчета позволяет не только выявлять особенности переходных процессов асинхронного двигателя при пуске с предвключенными сопротивлениями различного характера, но и, благодаря до-

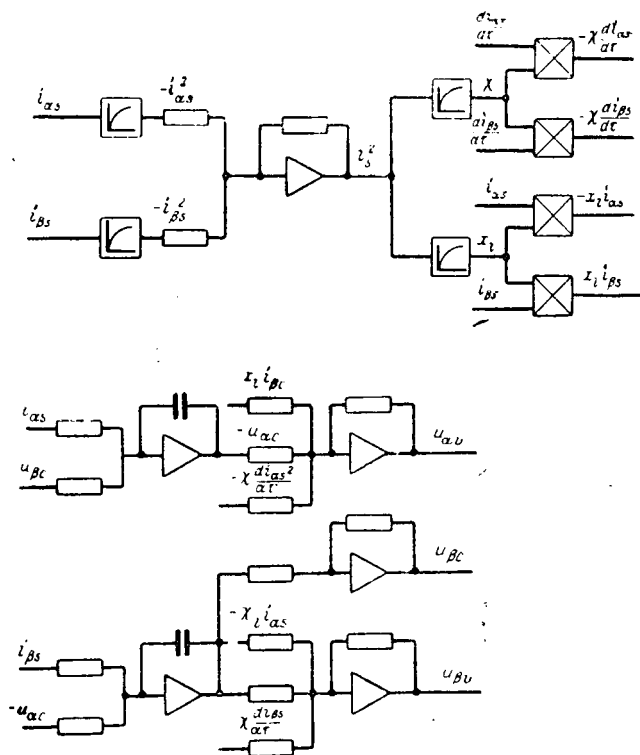


Рис. 5. Структурная схема модели для решения системы уравнения (12).

статочной для инженерной практики точности, может быть использован для выбора параметров этих сопротивлений с целью соответствующего формирования переходных процессов.

Предвключенные сопротивления емкостного характера являются единственным типом сопротивления, ограничивающим ударный момент двигателя при сохранении пускового момента на уровне паспортного значения. Однако из-за значительного габарита конденсаторов, необходимых для формирования такого переходного процесса, активно-емкостные предвключенные сопротивления рационально применять только при необходимости сохранения быстродействия приводов, пуск которых производится при значительных нагрузках. Так, для двига-

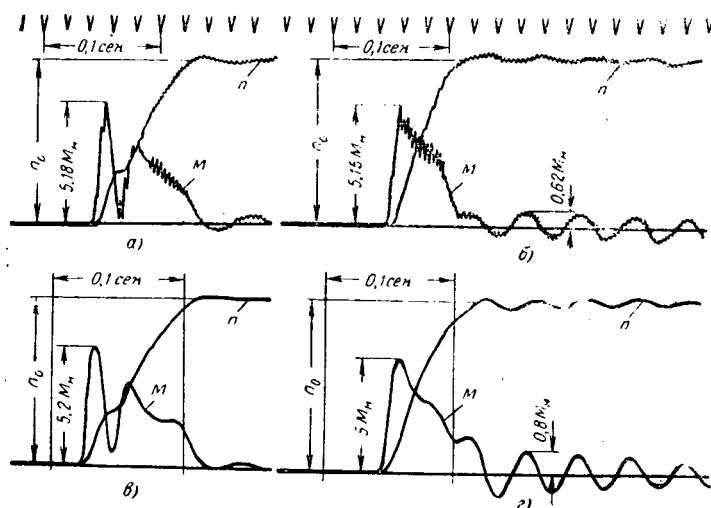


Рис. 6. Экспериментальные (а) и (б) и расчетные (в) и (г) осциллограммы момента и скорости при прямом пуске двигателя АО-31-4 (а) и (в) и пуске через конденсаторы 3×435 мкф (б) и (г).

теля мощностью 0,6 кВт необходима емкость на фазу 90—130 мкф, а для двигателя мощностью 3 кВт — эта емкость составляет 420—500 мкф.

Поэтому применение последовательно включенных конденсаторов для двигателей мощностью более 3 кВт в каждом отдельном случае требует технико-экономического анализа, учитывающего производительность механизма и уменьшение динамических нагрузок звеньев кинематической цепи.

Литература

1. Чиликин М. Г., Петров И. И., Воронцов Б. Б., Новые направления развития автоматизированного электропривода. Автоматизированный электропривод производственных механизмов, т. I, изд-во «Энергия», 1965.
2. Янко-Триницкий А. А., Уравнения переходных электромагнитных процессов асинхронного двигателя и их решения, «Электричество», 1951, № 3.
3. Wagner G. F., Self-excitation of induction motors with series capacitors, Trans. AIEE, 1941, v. 60.
4. Бауман В. Г., Иванов О. В. и Комаров Б. И., Самовозбуждение асинхронных двигателей с последовательными конденсаторами, «Электричество», 1961, № 5.

[11.4.1967]



Использование симметричного питания однофазным током для регулирования скорости трехфазных асинхронных двигателей

В. А. ЧУКБАР

Шатурский энергетический техникум

Известно, что достаточно широко распространенный метод регулирования скорости трехфазных асинхронных двигателей изменением скольжения неэкономичен и имеет целый ряд других недостатков. Наиболее перспективен другой способ, при котором скорость двигателя регулируется за счет изменения скорости вращения магнитного поля. Интенсивно разрабатывается частотное регулирование, а также продолжают исследования по усовершенствованию многоскоростных обмоток с переключением числа полюсов.

В статье исследуется возможность рекуперативного торможения трехфазных короткозамкнутых двигателей для перехода на пониженную («ползучую») скорость, необходимую для точного останова электропривода.

Как известно, для переключения числа полюсов обмотки статора необходима специальная, достаточно сложная обмотка. Предлагаемый метод позволяет получить утроение числа полюсов обмотки статора обычного трехфазного двигателя. Для этого используется симметричное питание обмотки статора однофазным током.

Рассмотрим процесс образования полюсов в обмотке статора при питании ее однофазным током по несимметричной и симметричной схемам.

На рис. 1 показана схема трехфазной однослойной обмотки ($z=24$, $y=6$, $q=2$, $2p=4$).

На рис. 2,а приведена схема растекания токов в этой обмотке при потере двигателем одной фазы. Как видно из схемы, несмотря на то, что двигатель при этом переходит в однофазный режим, число полюсов сохраняется прежним. Это объясняется тем, что питание однофазным током будет в этом случае несимметричным.

Схема растекания токов при симметричном питании обмотки однофазным током представлена на рис. 2,б. Как и на других схемах, здесь за положительное направление токов принято направление от начала фазы к ее концу.

Из рис. 2,б видно, что число полюсов в этой схеме $2p=12$. Интересно, что число пазов на полюс и фазу остается в обоих случаях одинаковым:

$$q_3 = \frac{z}{2p_3} = \frac{24}{4 \cdot 3} = 2$$

и

$$q_1 = \frac{z}{2p_1} = \frac{24}{12 \cdot 1} = 2,$$

т. е. $q_3 = q_1 = q$.

Так как $2p = \frac{z}{q_m}$, то при питании обмотки однофазным током $2p = \frac{z}{q}$. Следовательно, переводя m -фазную обмотку в однофазный режим, будем всегда получать в m раз большее число полюсов; $2p_1 = 2p_m \cdot m$. В частности, при переводе трехфазной ма-

шины в однофазный режим $2p_1 = 3 \cdot 2p_3$ или $p_1 = 3p_3$. Соответственно $n_{01} = \frac{1}{3} n_{03}$, т. е. получаем всегда втрое уменьшенную скорость вращения поля статора.

К этому же выводу можно прийти и чисто аналитически, что показано, например в [Л. 1], для случая симметричного питания обмотки статора постоянным током при динамическом торможении. Однако трактовка процесса образования утроенного числа полюсов, как результата выделения третьих пространственных гармоник при сложении н. с. обмоток фаз, может вызвать неправильное представление о механизме этого образования.

Симметричное питание двигателя однофазным током можно осуществлять по двум схемам: разомкнутого треугольника (рис. 3,а) и параллельного соединения всех трех фаз (рис. 3,б). Если обмотки фаз двигателя соединены треугольником и при данном напряжении сети, то по схеме рис. 3,б на каждой фазе двигателя сохраняется номинальное напряжение. Однако из-за уменьшения обмоточного коэффициента это приведет к недопустимому возрастанию магнитного потока, а следовательно и намагничивающего тока. Если в трехфазном режиме при данном напряжении обмотки двигателя были соединены в звезду, то схема рис. 3,б тем более недопустима. Поэтому в обоих случаях целесообразно применять схему рис. 3,а, если, конечно, исключить возможность понижения напряжения на двигателе каким-либо другим путем.

При наиболее часто встречающемся сейчас напряжении 380 в, когда фазы обмотки двигателя соединены в звезду, переход на схему рис. 3,а вызовет уменьшение напряжения на каждой фазе в 1,73 раза, что, учитывая снижение обмоточного коэффициента примерно в 1,7—1,9 раза, оставляет

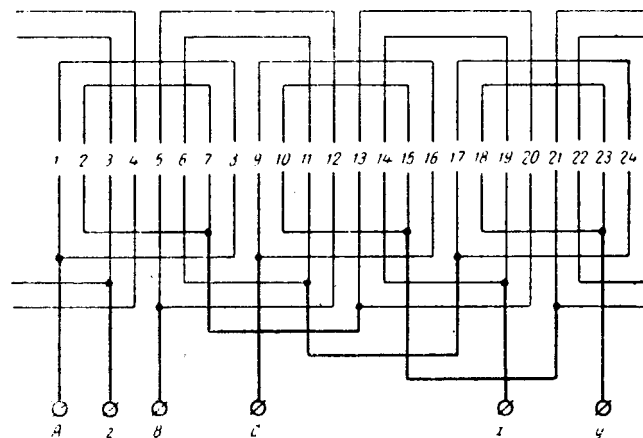


Рис. 1.

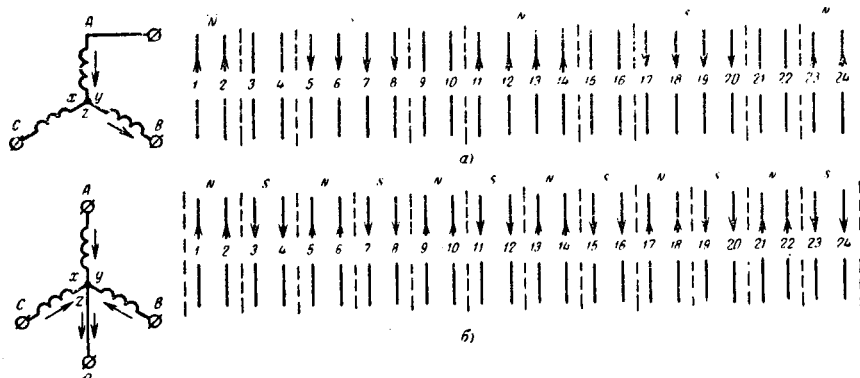


Рис. 2.

магнитный поток почти неизменным, или вызывает допустимое его повышение. Если напряжение сети 220 в и фазы обмотки двигателя соединены в треугольник, переход на схему разомкнутого треугольника вызывает уменьшение напряжения втрое. При этом токи и моменты в однофазном режиме невелики.

Определим токи в однофазном режиме, исходя из схемы замещения двигателя [Л. 5]. Пусть U_1 — фазное напряжение, необходимое для проведения тока прямой последовательности; U_2 — соответственно напряжение для тока обратной последовательности; $z_1 = r_1 + jx_1$ — сопротивление фазы статора, одинаковое для обеих систем токов;

$$z'_{21} = \frac{r'_2}{s} + jx'_2$$

— сопротивление фазы ротора токам частоты fs ;

$$z'_{22} = \frac{r'_2}{2-s} + jx'_2$$

— сопротивление фазы ротора токам частоты $f(2-s)$. Тогда

$$\begin{aligned} \dot{U} &= \dot{U}_1 + \dot{U}_2 = I_1 \left(z_1 + \frac{1}{\frac{1}{z_m} + \frac{1}{z'_{21}}} \right) + \\ &+ I_2 \left(z_1 + \frac{1}{\frac{1}{z_m} + \frac{1}{z'_{22}}} \right). \end{aligned}$$

А так как $I_1 = I_2$, то схема замещения получит вид рис. 4.

Из схемы замещения определим ток холостого хода

$$I_0 = \frac{U}{z_1 + z_m + z_1 + \frac{z'_{22} \cdot z_m}{z'_{22} + z_m}},$$

так как при этом $s = 0$ и $z'_{21} = \infty$.

Кроме того, $z'_{22} = \frac{r'_2}{2} + jx'_{22}$, но $x'_{22} = 2\pi f(2-s)L_2$ — весьма велико. Поэтому

$$\frac{z'_{22} \cdot z_m}{z'_{22} + z_m} \approx z_m.$$

$$I_0 \approx \frac{U}{2z_1 + 2z_m}.$$

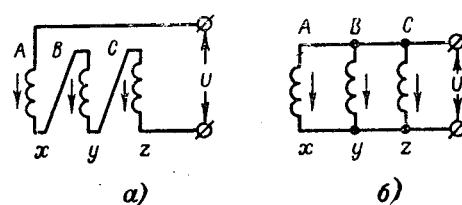


Рис. 3.

Аналогично для тока короткого замыкания:

$$I_K = \frac{U}{z_1 + \frac{z_m z'_{21}}{z_m + z'_{21}} + z_1 + \frac{z_m z'_{22}}{z_m + z'_{22}}},$$

где

$$z'_{21} = z'_{22} = r'_2 + jx'_2.$$

Как показывают расчеты и эксперименты, сопротивление намагничивающей цепи в рассматриваемом режиме соизмеримо с сопротивлением цепи ротора, поэтому

$$I_K = \frac{U}{2z_1 + z_m}.$$

А поскольку $z_1 > z_m$ то, сравнивая выражения для токов I_0 и I_K , видим, что в однофазном режиме ток короткого замыкания лишь незначительно превышает ток холостого хода. Экспериментальное исследование различных двигателей малой и средней мощности дает следующие отношения:

$$\frac{I_{K1}}{I_{01}} = 1,1; 1,17; 1; 1,16; 1,2.$$

Большая величина намагничивающего тока объясняется в основном тремя причинами.

Во-первых, утраиваются пазовый сдвиг и укорочение шага ($\alpha_1 = 3\alpha_3$; $\beta_1 = 3\beta_3$), несмотря на то, что, как было показано, число пазов на полюс и фазу q остается в однофазном режиме таким же, как в трехфазном. Соответственно этому обмоточный коэффициент $k_{об1}$ в однофазном режиме для двигателей среднего диапазона мощностей составляет $0,5 \div 0,57$, в то время, как в трехфазном режиме обычно $k_{об3} = 0,96$. Отсюда следует, что при одном и том же фазном напряжении ($U \approx 4,44 k_{об3} f \omega \Phi_m$) амплитудное значение магнитного потока будет в однофазном режиме примерно вдвое большим.

Во-вторых, из-за того, что на каждый полюс теперь приходится всего q пазов, т. е. втрое меньше обычного для данного двигателя, распределение магнитной индукции в воздушном зазоре резко отличается от синусоидального. Укорочение шага практически еще больше уменьшает число пазов на полюс и фазу. Это значит, что в магнитном потоке будут резко выражены паразитные гармоники, главную роль среди которых играет девятая гармоника.

В-третьих, весьма существенно влияние насыщения зубцов [Л. 3].

Большая величина намагничивающего тока сказывается также в том, что при работе двигателя

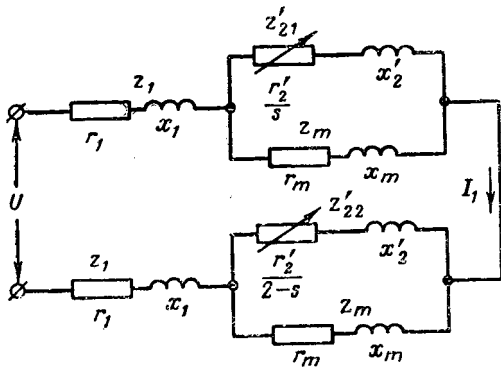


Рис. 4.

с механической нагрузкой на валу потребляемый им ток лишь незначительно отличается от тока холостого хода. Таким образом, в однофазном режиме все три тока (холостого хода, короткого замыкания и нагрузочный) близки по величине. Для сравнения величин токов в однофазном и трехфазном режимах по схеме рис. 3,а были проведены эксперименты. Обмотки фаз исследуемых двигателей были соединены в звезду.

Приводим результаты экспериментов:

$$\frac{I_{K1}}{I_{K3}} = 1,25; 1,07; 1,11; 1,18.$$

При напряжении, уменьшенном в однофазном режиме вдвое:

$$\frac{I_{K1}}{I_{K3}} = 0,94; 1; 0,835; 0,9.$$

При той же схеме для двигателей, работающих при данном напряжении сети с обмоткой, соединенной треугольником, т. е. при напряжении, уменьшенном в однофазном режиме втрое:

$$\frac{I_{K1}}{I_{K3}} = 0,475; 0,62; 0,5; 0,473.$$

Величина сопротивления намагничивающей цепи может быть найдена на основании данных опыта из выражения:

$$I_0 \approx \frac{\dot{U}_\phi}{2z_1 + 2z_m},$$

откуда

$$z_m = \frac{\dot{U}_\phi - 2I_0 z_1}{2I_0}.$$

Кривая момента двигателя в однофазном режиме анализируется в отдельной работе. Здесь излагаются только предварительные соображения. В первом приближении кривая момента однофазного двигателя может быть рассчитана по уравнению [Л. 4]:

$$M = M_1 - M_2 = \frac{2M_K(1+\epsilon)}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s} + 2\epsilon} - \frac{2M_K(1+\epsilon)}{\frac{2-s}{s_K} + \frac{s_K}{2-s} + 2\epsilon},$$

где M_K — критический момент, создаваемый прямым и обратным полями в отдельности. Как известно, н. с. трехфазного вращающегося поля $F_3 = \frac{3}{2} F_{1m}$, где F_{1m} — амплитуда н. с. одной фазы.

Но в каждой фазе $F_{1m} = F_{1обр} = \frac{1}{2} F_{1m}$.

Следовательно, для двигателя в целом при симметричном питании однофазным током, когда работают все три фазы $F_{3пр} = F_{3обр} = 3F_{1пр} = 3F_{1обр} = \frac{3}{2} F_{1m}$, откуда $F_{3пр} = F_{3обр} = F_3$ и можно заключить, что M_K представляет собой критический момент того же двигателя при трехфазном режиме работы, однако фазное напряжение и обмоточный коэффициент соответствуют однофазному режиму. К этому же выводу можно прийти, если рассмотреть выражение н. с. для многофазной обмотки:

$$F_{a[m,2p]} = m 0,9 I \omega k_{об},$$

где ω — число последовательно соединенных витков одной фазы.

Критическое скольжение также изменяется, поскольку с увеличением числа полюсов втрое, во столько же раз уменьшается полюсное деление, а следовательно, меняется сопротивление части клетки ротора, приходящейся на каждый полюс статора [Л. 2].

Согласно [Л. 1] в среднем критическое скольжение при переходе с трехфазного режима на однофазный должно увеличиваться: $s_{K(1)} \approx 2,25 s_{K(3)}$ (при расчете скольжения по синхронной скорости трехфазного режима).

На кривую, построенную по этому уравнению, накладываются кривые моментов от высших гармоник н. с., из которых, как отмечалось, наиболее существенна девятая. Испытание целого ряда трехфазных двигателей в однофазном режиме показало, что все они устойчиво работают на скорости, близкой к $\frac{1}{3}$ от номинальной, а некоторые из них самостоятельно трогались с места, т. е. обладали в однофазном режиме пусковым моментом. Во всех случаях — при пуске или при переходе из трехфазного режима в однофазный «на ходу» с рекуперативным торможением — двигатели «застревали» на пониженной скорости, если статическая нагрузка

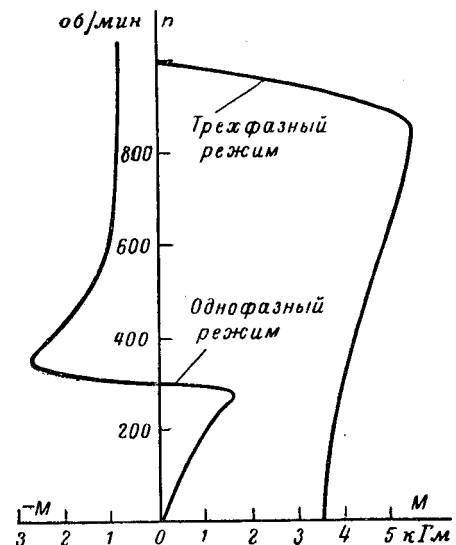


Рис. 5.

на валу не превышала критического момента однофазного двигательного режима.

Рекуперативное торможение, автоматически возникающее при переводе двигателя из трехфазного режима в однофазный, представляет практический интерес. Кривая момента при вращении двигателя в сторону прямого поля со сверхсинхронной скоростью без учета высших гармоник рассчитывается по уравнению:

$$M = \frac{2M_{к,геп}(1+2)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} - 2\epsilon} - \frac{2M_{к,двиг}(1+\epsilon)}{\frac{2-s}{s_k} + \frac{s_k}{2-s} + 2\epsilon}.$$

Соответствующие кривые показаны на рис. 5 применительно к двигателю А51-6 ($P_n=2,8$ кВт, $n_n=950$ об/мин, $U_n=220/380$ в).

Выводы. 1. Методом симметричного питания обмотки статора трехфазного асинхронного электродвигателя однофазным переменным током можно утроить число полюсов обычного серийного двигателя без применения специальной сложной обмотки. При этом возможна устойчивая работа двигателя при скорости, равной трети номинальной.

2. Перевод двигателя из трехфазного режима в однофазный позволяет получить достаточно эффективное рекуперативное торможение при переходе с номинальной скоростью на пониженную.



О применении направленных графов и структурных схем для анализа электрических цепей и систем автоматического управления

Доктор техн. наук, проф. П. А. ИОНКИН и инж. В. П. ВАЩЕНКО

Московский энергетический институт

В теории автоматического управления для анализа и синтеза систем широко применяется структурный метод. Поскольку большое число таких систем непосредственно состоит из электромагнитных элементов и процессы, протекающие в системах, могут быть представлены соответствующими электрическими моделями, то задачи анализа и синтеза автоматических систем управления во многих случаях сводятся к задачам анализа и синтеза линейных и нелинейных электрических цепей.

Для решения таких задач в последние годы начинают применять топологические методы и методы, основанные на теории направленных графов [Л. 1]. Основной смысл указанных методов помимо их наглядности состоит в том, что объем математических операций, которые необходимо произвести при определении соответствующих величин с помощью общих выражений, получается близким к минимальному. Покажем прежде всего, что структурные схемы электрических цепей [Л. 2] или так называемые операторные схемы [Л. 3, 4], которые широко применяются для исследования систем автоматического управления, представляют собой по существу направленные графы при несколько ином их изображении.

3. Способ предварительного торможения трехфазных двигателей может конкурировать с конденсаторным торможением. Обладая тем же основным недостатком, отсутствием тормозного момента при низких скоростях, предлагаемый способ в то же время обладает рядом несомненных преимуществ: не требует конденсатора и вообще никаких дополнительных устройств, кроме переключателя схемы двигателя, экономичен, так как торможение происходит с отдачей активной энергии в сеть, не дает срыва торможения при высоких скоростях.

Литература

1. Мейстель А. М. и Рашкович М. П., Симметричное динамическое торможение асинхронных короткозамкнутых двигателей в станочных приводах «Электричество», № 7, 1964.
2. Стульников В. И., Расчет максимального момента и критического скольжения при динамическом торможении асинхронных двигателей, «Электричество», 1955, № 9.
3. Петров И. И., Мейстель А. М., Некоторые вопросы расчета специальных режимов асинхронных короткозамкнутых двигателей, «Электричество», 1965, № 11.
4. Андреев В. П. и Сабинин Ю. А., Основы электропривода, Госэнергоиздат, М., 1956.
5. Пнотровский Л. М., Электрические машины, Госэнергоиздат, М., 1960.

[21.4.1967]

УДК 621.3.011.1

На рис. 1 показана разветвленная схема с одним источником напряжения. Для построения графа такой схемы выберем дерево из сопротивлений Z_2, Z_4, Z_6 и источника напряжения \dot{U} (рис. 2). Напряжения на ветвях связи (дополняющих ветви дерева до заданной схемы) найдем из схемы на рис. 2 по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U} - \dot{U}_2; & \dot{U}_3 &= \dot{U}_2 - \dot{U}_4; \\ \dot{U}_7 &= \dot{U}_2 + \dot{U}_6 - \dot{U}_4; & \dot{U}_5 &= \dot{U} - \dot{U}_2 - \dot{U}_6. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Затем по закону Ома можно определить токи:

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= \dot{U}_1 Y_1; & i_3 &= \dot{U}_3 Y_3; \\ i_7 &= \dot{U}_7 Y_7; & i_5 &= \dot{U}_5 Y_5. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Теперь с помощью первого закона Кирхгофа можно сразу записать выражения для токов в ветвях дерева через токи в ветвях связи:

$$\left. \begin{aligned} i_6 &= i_5 - i_7; & i_4 &= i_3 + i_7; \\ i_2 &= i_1 - i_3 + i_5 - i_7. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Наконец, по закону Ома легко выразить напряжения на ветвях дерева через найденные токи и сопротивления соответствующих ветвей:

$$\dot{U}_4 = Z_4 i_4; \quad \dot{U}_6 = Z_6 i_6; \quad \dot{U}_2 = Z_2 i_2. \quad (4)$$

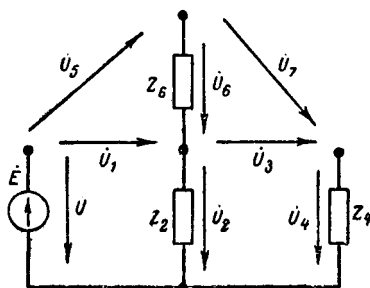


Рис. 2.

$$\left. \begin{aligned} Z_{11}\dot{i}_1 + Z_{12}\dot{i}_2 + \dots + Z_{1n}\dot{i}_n + \dots + Z_{1k}\dot{i}_k &= E_1; \\ Z_{21}\dot{i}_1 + Z_{22}\dot{i}_2 + \dots + Z_{2n}\dot{i}_n + \dots + Z_{2k}\dot{i}_k &= E_2; \\ . &. \\ Z_{n1}\dot{i}_1 + Z_{n2}\dot{i}_2 + \dots + Z_{nn}\dot{i}_n + \dots + Z_{nk}\dot{i}_k &= E_n; \\ . &. \\ Z_{k1}\dot{i}_1 + Z_{k2}\dot{i}_2 + \dots + Z_{kn}\dot{i}_n + \dots + Z_{kk}\dot{i}_k &= E_k. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Рис. 3.

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= \frac{1}{Z_{11}} [\dot{E}_1 - (Z_{12} i_2 + \\ &+ Z_{13} i_3 + \dots + Z_{1n} i_n + \dots + Z_{1k} i_k)]; \\ i_2 &= \frac{1}{Z_{22}} [\dot{E}_2 - (Z_{21} i_1 + \\ &+ Z_{23} i_3 + \dots + Z_{2n} i_n + \dots + Z_{2k} i_k)]; \\ &\dots \dots \dots \\ i_n &= \frac{1}{Z_{nn}} [\dot{E}_n - (Z_{n1} i_1 + Z_{n2} i_2 + \dots \\ &\dots + Z_{n(n-1)} i_{n-1} + \dots + Z_{nk} i_k)]; \\ &\dots \dots \dots \\ i_k &= \frac{1}{Z_{kk}} [\dot{E}_k - (Z_{k1} i_1 + Z_{k2} i_2 + \dots \\ &\dots + Z_{kn} i_n + \dots + Z_{k(k-1)} i_{k-1})]. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Рис. 4.

[illegible]

Поскольку применяемые при расчетах цепей структурные схемы совпадают со схемами соответствующих направленных графов, и методы расчета таких цепей по структурным схемам и по схемам направленных графов по существу также совпадают. Известно [Л. 6, 7], что для определения входных и взаимных сопротивлений и проводимостей применяются различные формулы разложения определителей узловых проводимостей $\Delta^{(y)}$ или контурных сопротивлений $\Delta^{(k)}$ и их алгебраических дополнений. В [Л. 3] приведены формулы разложения относительных значений определителей и их алгебраических дополнений. Установим связь между

$$\left. \begin{aligned} (Z_1 + Z_2) \dot{I}_{1K} - Z_2 \dot{I}_{2K} - Z_1 \dot{I}_{3K} &= E; \\ -Z_2 \dot{I}_{1K} + (Z_2 + Z_3 + Z_4) \dot{I}_{2K} - Z_3 \dot{I}_{4K} &= 0; \\ -Z_1 \dot{I}_{1K} + (Z_1 + Z_5 + Z_6) \dot{I}_{3K} - Z_6 \dot{I}_{4K} &= 0; \\ -Z_3 \dot{I}_{2K} - Z_6 \dot{I}_{3K} + (Z_3 + Z_6 + Z_7) \dot{I}_{4K} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Здесь следует особо подчеркнуть, что результат разложения относительного значения определителя изложенным способом и по формуле из [Л. 3] зависит от того, какие ветви выбираются в качестве основного дерева. Число различных относительных значений определителя для одной и той же схемы, очевидно, равно числу деревьев заданной схемы. Поскольку при определении входных и взаимных проводимостей приходится применять изложенные способы не только для разложения относительных значений определителей, но и их алгебраических дополнений, то результаты расчетов получаются, конечно, правильными.

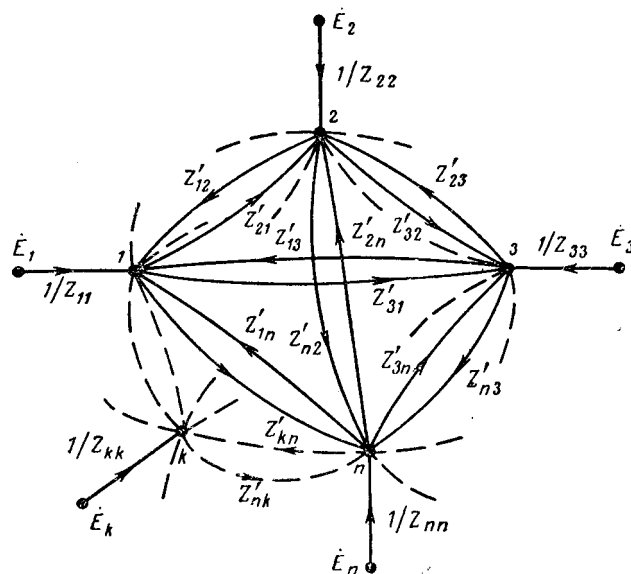


Рис. 6.

Покажем также, что применение известной формулы Мезона [Л. 7, 8]

$$\Delta = 1 - \sum_k L_k^{(1)} + \sum_k L_k^{(2)} - \sum_k L_k^{(3)} + \dots \quad (9)$$

для разложения определителя графа, составленного на основании законов Кирхгофа, дает выражение, целиком совпадающее с разложениями относительного значения определителя.

С этой целью рассмотрим в качестве примера уравнения (1)–(4), из которых после преобразования получается следующая система уравнений с неизвестными напряжениями \dot{U}_2 , \dot{U}_4 и \dot{U}_6 на ветвях дерева:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_2 [1 + Z_2(Y_1 + Y_3 + Y_5 + Y_7)] - \dot{U}_4 Z_2(Y_3 + Y_7) + \dot{U}_6 Z_2(Y_5 + Y_7) &= \dot{U} Z_2(Y_1 + Y_5); \\ -\dot{U}_2 Z_4(Y_3 + Y_7) + \dot{U}_4 [1 + Z_4(Y_3 + Y_7)] - \dot{U}_6 Z_4 Y_7 &= 0; \\ \dot{U}_2 Z_6(Y_5 + Y_7) + \dot{U}_4 Z_6 Y_7 + \dot{U}_6 [1 + Z_6(Y_5 + Y_7)] &= \dot{U} Z_6 Y_5. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Определитель этой системы уравнений, являющийся определителем графа с напряжениями на ветвях дерева \dot{U}_2 , \dot{U}_4 и \dot{U}_6 , имеет следующий вид:

$$\Delta^* = \begin{vmatrix} 1 + Z_2(Y_1 + Y_3 + Y_5 + Y_7) & -Z_2(Y_3 + Y_7) & Z_2(Y_5 + Y_7) \\ -Z_4(Y_3 + Y_7) & 1 + Z_4(Y_3 + Y_7) & -Z_4 Y_7 \\ Z_6(Y_5 + Y_7) & -Z_6 Y_7 & 1 + Z_6(Y_5 + Y_7) \end{vmatrix} \quad (11)$$

Так как каждое слагаемое в диагональных элементах этого определителя (за исключением единицы) численно равно постоянной передачи соответствующего контура графа (рис. 3), взятой с отрицательным знаком, то применение формулы Мезона (9) приводит к выражению $\Delta^{(K)} Y_1 Y_3 Y_5 Y_7$.

Таким образом, все слагаемые определителя графа, построенного на основании законов Кирхгофа, получаются в виде безразмерных постоянных передачи контуров или их произведений только с положительными знаками. Общее число членов такого определителя равно сумме деревьев заданной схемы.

Если формулу Мезона (9) применить для разложения определителя графа на рис. 6, построенного по уравнениям (7), то легко получить выражение для относительного значения нового контурного определителя, получающегося путем деления определителя

$$\Delta^{(K)} = \begin{vmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & \dots & Z_{1n} & \dots & Z_{1k} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & \dots & Z_{2n} & \dots & Z_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & Z_{n3} & \dots & Z_{nn} & \dots & Z_{nk} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{k1} & Z_{k2} & Z_{k3} & \dots & Z_{kn} & \dots & Z_{kk} \end{vmatrix} \quad (12)$$

на произведение всех собственных контурных сопротивлений $Z_{11} Z_{22} \dots Z_{nn} \dots Z_{kk}$:

$$\begin{aligned} & \frac{\Delta^{(K)}}{Z_{11} Z_{22} \dots Z_{nn} \dots Z_{kk}} = \\ & = 1 - \sum_k L_k^{(1)} + \sum_k L_k^{(2)} - \sum_k L_k^{(3)} + \dots \quad (13) \end{aligned}$$

Например, определитель графа, построенного для схемы рис. 1 (аналогично рис. 6), получается равным:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta^{(K)}}{Z_{11} Z_{22} Z_{33} Z_{44}} &= 1 - \frac{Z_2^2}{Z_{11} Z_{22}} - \frac{Z_1^2}{Z_{11} Z_{33}} - \frac{Z_3^2}{Z_{22} Z_{44}} - \\ & - \frac{Z_6^2}{Z_{33} Z_{44}} + \frac{Z_3^2 Z_1^2 + Z_2^2 Z_6^2 - 2 Z_1 Z_2 Z_3 Z_6}{Z_{11} Z_{22} Z_{33} Z_{44}}. \quad (14) \end{aligned}$$

Аналогично (14) можно найти относительное значение определителя узловых проводимостей.

Эти важные соотношения между определителями графов, полученные на основании различных аналитических выражений (законов Кирхгофа, контурных и узловых уравнений) позволяют не только анализировать цепи, но и довольно просто выражать одни величины через другие.

С целью обобщения полученных результатов необходимо подчеркнуть, что структурная схема изображает математические связи между звеньями, определяемые дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами, а условия передачи сигналов звеньями имеют алгебраическое описание в области изображений временных процессов, преобразованных по Лапласу или по Фурье [Л. 2]. Направленный линейный граф представляет собой графическое изображение системы линейных алгебраических уравнений, в том числе полученных в результате преобразований по Лапласу или Фурье. Следовательно, отвлекаясь от конкретного приложения, видим, что сущность структурной схемы и направленного графа одна и та же.

Таким образом, структурные схемы [Л. 2], с помощью которых изображаются и решаются линейные алгебраические уравнения для электрических цепей или для систем автоматического управления, по существу представляют собой направленные графы. Так, например, рассматривая в [Л. 2] рис. 1.1 (структурное изображение дифференциального уравнения связи) как направленный граф и применяя формулу Мезона для определения передаточной функции этого графа [Л. 8], получаем выражение, полностью совпадающее с (1–11а) в [Л. 2].

Следует также отметить, что правила перестановки звеньев структурных схем и правила их свертывания [Л. 2] по существу совпадают с соответствующими правилами и формулами преобразования графов [Л. 5].

Литература

1. Траксел Д. Г., Синтез систем автоматического регулирования, Машгиз, 1959.
2. Шаталов А. С., Структурные методы в теории управления и электроавтоматике, Госэнергоиздат, 1962.
3. Сучилин А. М., Структурный метод анализа электрических цепей с электронными и полупроводниковыми усилителями. Научный совет по кибернетике АН УССР, Киев, 1964.
4. Сучилин А. М., Основы вычислительной техники, изд-во «Энергия», 1964.
5. Ионкин П. А., Соколов А. А., Топологический анализ электрических цепей, «Электричество», 1964, № 4.
6. Ионкин П. А., Соколов А. А., Основы построения и преобразования графов для расчета электрических цепей, «Электричество», 1964, № 5.
7. Мезон С., Циммерман Г., Электронные цепи, сигналы и системы, Изд-во иностр. лит., 1963.
8. Ионкин П. А., Общие уравнения для расчета цепей с помощью графов, «Электричество», 1964, № 8.

[27.7.1966]

Применение электронных цифровых вычислительных машин для всестороннего анализа электрической нагрузки больших промышленных предприятий

Инж. Г. И. ВАЙДНЕР

ГДР

Настоящая статья посвящена анализу при помощи ЭЦВМ потребления электрической мощности и энергии большими промышленными предприятиями ГДР. Исходными данными для этого анализа являются средние значения потребляемых мощностей, параметры оборудования и схема и параметры сети.

Предложенный всесторонний анализ нагрузок открывает новую область применения цифровых вычислительных машин в энергетике, в особенности при определении геометрических размеров сетей энергоснабжения в стадии проектирования.

Вследствие ограниченности объема в статье приводится только принципиальное описание методов анализа.

Содержание проводимого анализа нагрузок. При проектировании больших промышленных предприятий необходимо уточнение потребности в электрической мощности и энергии для определения параметров установок, стоимости энергии для промежуточного и конечного продуктов, планирования энергетического хозяйства.

Известно, что определение соответствующих количественных показателей, особенно для больших промышленных установок, встречает затруднение. В ГДР разработан расчетный метод для анализа потребления мощности и энергии (с использованием ЭЦВМ), который аналогичен разработанным в СССР методам расчета.

Программа расчета составлена для большой радиальной сети, принципиальная схема которой показана на рис. 1*. На всех уровнях напряжения сети были вычислены средние активные и реактивные мощности наиболее нагруженной смены в течение одного полугодия, а также 15 мин максимальные нагрузки и соответствующие коэффициенты мощности. Кроме этого вычислялась сумма потерь в кабелях и сумма потерь в трансформаторах. Колебания, обусловленные режимом сменности и временами года, могут быть просто учтены для всех полученных результатов. Распределение потребления электроэнергии по отдельным объектам производилось только на самом низком напряжении; на других уровнях производилось распределение по группам объектов или по отдельным объектам, указанным технологами или экономистами.

* Программу разработали С. Шмидт и Г. Бис из «Конструкторского и инженерного бюро химии», Лейпциг.

Расчет средних и максимальных нагрузок. Расчет базируется на средней потребляемой мощности и параметрах электрического оборудования. Исходными данными являются:

1) для потребителей и средств компенсации реактивной мощности—количество однородных потребителей, относительное время включения, номинальная мощность, средняя потребляемая активная мощность, номинальный коэффициент полезного действия, номинальный коэффициент мощности, реактивная мощность электрического оборудования с компенсирующим действием;

2) для кабелей (включая данные для определения энергии)—длина, активное сопротивление, сечение, напряжение, объект, длительность работы, степень использования энергии;

3) для трансформаторов—номинальная мощность, напряжение короткого замыкания, реактивная и активная мощность холостого хода, потери активной мощности в номинальном режиме, реактивная мощность при компенсации базисной нагрузки.

Расчет для асинхронных двигателей. Так как в ГДР в настоящее время отсутствуют утвержденные нормы на коэффициенты мощно-

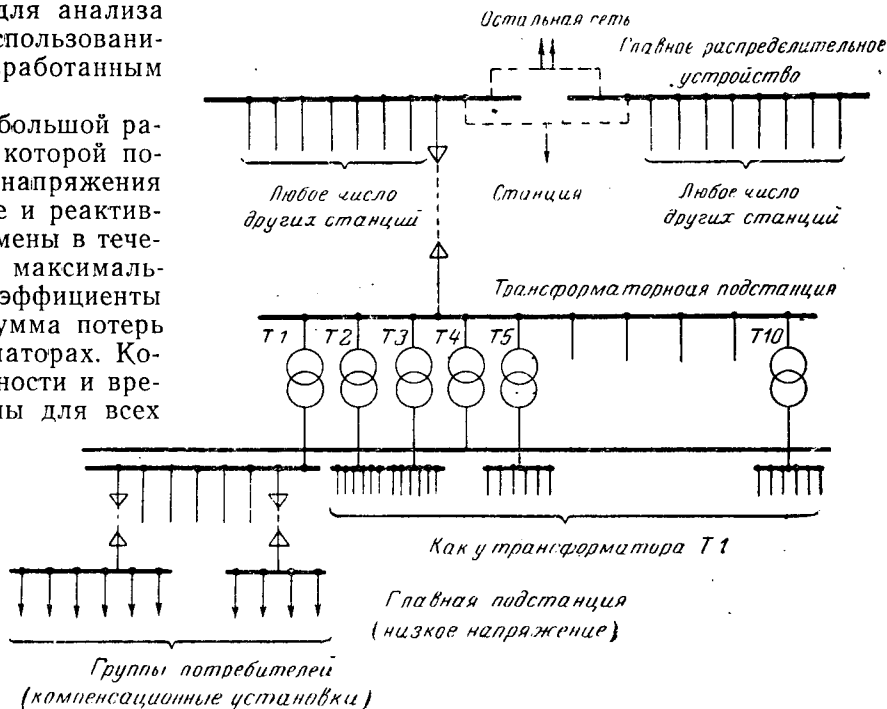


Рис. 1. Упрощенная схема исследуемой сети электроснабжения.

сти, которые содержатся в советских нормативах, то средняя активная и реактивная мощности вычислялись по величинам потребляемой сетью номинальной мощности и номинальным коэффициентам полезного действия и мощности. Поставщики двигателей дают кривые для асинхронных трехфазных двигателей, по которым с хорошим приближением можно определить значения к. п. д. и коэффициента мощности при частичной нагрузке. В расчетах принимается средняя кривая для двигателей с короткозамкнутым ротором и для двигателей с контактными кольцами, которая учитывает различное количество этих типов двигателей.

Кроме этого вычислительная программа дает возможность учесть особые условия работы синхронных двигателей.

Расчет для печей с активными сопротивлениями, индукционных печей и освещения. Нагрузка от освещения и отопления практически представляет собой постоянную составляющую и поэтому для нее не производится такой расчет, как для двигателей.

Нагрузка печи может быть трех типов: пусковая, базисная и регулируемая. Эти нагрузки учитываются в расчете аналогично освещению.

Учет компенсирующих устройств. Компенсация базисной нагрузки трансформаторов обрабатывается как реактивная составляющая тока осветительной нагрузки. Благодаря этому устраняется ошибка, которая возникла бы, если расчет вести с учетом снижающих коэффициентов, как это делается для двигателей. При индивидуальной компенсации двигателей рассматривают реактивную составляющую тока как двигательную составляющую, так как конденсатор не работает при выключенном двигателе.

Определение потребления энергии и потерь в сети. Для экономических расчетов необходимо разделение потребления энергии и потерь энергии по отдельным потребителям или по объектам. В исследованном примере вычислялась зависимость потребления энергии от степени использования энергии, фонда рабочего времени и средней мощности.

Для двигателей большой мощности при сильно пульсирующем потреблении мощности степень использования энергии надо определять графически по данным технологического режима (например, для приводов компрессоров установок для кондиционирования воздуха).

В немецкой литературе отсутствуют аналитические выражения для определения коэффициента максимума, к. п. д. и коэффициента мощности. Поэтому были получены приближенные выражения, отличающиеся не более чем на 1% от точных значений, определенных графически.

Сбор данных у потребителей и в сети. Сбор происходит по системе карт, которая расчленяется соответственно структуре сети. Существуют карты для двигателей, приборов отопления, конденсаторов, кабелей и трансформаторов. Карты каждого типа потребителей обрабатываются отдельно. С помощью простого кода карты маркируются относительно режима смен и времени года, так что при трех сменах в день надо вычислять шесть вариантов. По

этой сборной картотеке перфорируется счетная картотека (или лента).

Объем сети. Объем сети ограничен емкостью запоминающего устройства немецкой машины ZRA-1. В сети рис. 1 можно включить 15 трансформаторных подстанций с 10 фидерами каждая с подключением к каждому фидеру еще 10 подстанций.

Вычисление параметров оборудования. Руководствуясь средними и максимальными значениями нагрузок, можно выбрать кабели и трансформаторы по их нагреву, который вызывается рабочим током. Для этого надо предусмотреть в картотеке пустые карты, которые при повторном расчете заменяются картами, содержащими фактические данные. Самой собой разумеется, что возможно изменение сочетания потребителей с распределительными устройствами. Можно учитывать изменения коммутационного режима, числа резервных трансформаторов и резервного питания.

Кроме уже упомянутых значений нагрузки главных подстанций, трансформаторных отводов и трансформаторных подстанций, а также главного распределительного устройства, для всей сети было намечено количество двигателей, их распределение по отдельным ступеням мощности, установлены номинальные мощности (двигателей, отопления, освещения) и потери мощности.

Распределение энергопотребления и потерь дано в примере для 30 отдельных потребителей или объектов. При этом учитывались отдельно потери в питающих кабелях и потери в трансформаторах.

Анализ нагрузки заводов с изменчивым ассортиментом. В [Л. 1] отмечено, что корреляционные функции для одного определенного вида продукции не имеют общего характера, а зависят от производственных особенностей. Поэтому они не могут являться основой для универсальной вычислительной программы. В противоположность этому составленная программа позволяет определять изменения нагрузки, обусловленные изменением ассортимента.

Преимущества и недостатки нового исследовательского метода. Достигнутая за счет использования ЭЦВМ высокая точность вычислений не ведет к тому, что результат свободен от неточностей, которые свойственны теории. Сказывается отсутствие статических данных о коэффициентах нагрузки в ГДР. Здесь не надо доказывать, что те данные, которые дает технолог или инженер по технической эксплуатации, выше действительных.

Несмотря на эти недостатки, преимущества метода весьма существенны. Благодаря применению ЭЦВМ он может быть использован для комплексного исследования сетей. Повышается убедительность и наглядность результатов. Существенным оказывается повышение производительности труда, так как оператор освобожден от проведения объемистых расчетов и поэтому может с большей тщательностью взяться за сбор данных. Так, например, из суммарных данных по главному распределительному устройству было получено количество двигателей определенной мощности, которое работает в отдельных сменах. Поэтому возможно уже во время проектных работ оценить требуемую рабочую силу, запасы материала для эксплуатации и

ремонта и т. п. В картотеку можно легко внести изменения, которые получаются во время проектных работ. Можно уточнить отдельные коэффициенты картотеки и тем самым повысить точность расчетов и при строительстве предприятий.

Программа, как указывалось выше, может быть применена также для определения геометрических размеров сети.

Литература

1. Шенкель Г., Определение функций потребления энергии. Работы по практическому энергохозяйству. Техническое издательство Х. Ренц, Мюнхен и Карлсруэ, 1961.

2. Вайднер Х. И., Определение электрических нагрузок промышленных предприятий, часть I и II, Журнал «Энерготехник», (1963, № 11 и № 12.

[3.9.1966]

УДК 621.316.933.1.027.875

Электрические характеристики координирующего промежутка на напряжение 750 кВ

Инж. О. В. ВОЛКОВА

Всесоюзный электротехнический институт имени В. И. Ленина

Использование напряжения 750 кВ приводит к появлению весьма длинных гирлянд, обладающих высокой импульсной прочностью — порядка 3 000 кВ. При этом на подстанции могут возникнуть импульсные волны значительной амплитуды, приводящие к повышению остаточного напряжения на разрядниках. Последнее потребовало бы увеличения испытательного напряжения оборудования. Для ограничения возможных волн перенапряжений целесообразно применить специальные координирующие промежутки [Л. 1].

Исследования ВЭИ [Л. 2] и опыт эксплуатации защитных промежутков, установленных в сетях 500 кВ, показали, что промежутки очень простой конструкции обладают удовлетворительными электрическими характеристиками.

Координирующий промежуток 750 кВ наиболее рационально расположить на натяжной гирлянде анкерной или угловой опоры. В ВЭИ были исследованы координирующие промежутки размером 2,6; 3,0 и 3,8 м. Промежутки монтировались на натяжной четырехцепной гирлянде из изоляторов типа ЛС-30 с арматурой, предназначенной для линии 750 кВ Конаково — Белый Раст.

Электроды служили две алюминиевые трубы диаметром 80 мм, на концах которых находились медные шары диамет-

ром 150 мм. Провод и шлейф имитировались трубами диаметром 35 мм, длиной 6 м, расположенными по вершинам квадрата со стороной 600 мм. Линейный провод совмещался с осью гирлянды, а шлейф был направлен под углом порядка 60° к оси гирлянды. Расстояние между осями промежутка и гирлянды составляло 1,5 м.

Гирлянда крепилась к траверзе длиной 18 м, сечением $1,0 \times 1,2$ м², и поднималась над полом высоковольтного зала на высоту 25 м. Во время опытов гирлянда подвешивалась вертикально, однако соответствующим подбором расположения отходящих проводов, шлейфа и расстояния до заземленных объектов достигалась конфигурация поля, соответствующая натяжной гирлянде на реальной опоре.

Во время испытаний определялись характеристики координирующего промежутка при стандартной импульсной и коммутационных волнах обеих полярностей, а также при плавном подъеме напряжения промышленной частоты. Методика испытаний при стандартной импульсной волне и плавном подъеме напряжения промышленной частоты соответствовала ГОСТ 1516-60.

При стандартной импульсной волне определялись вольт-секундные характеристики на обеих полярностях, 50-% разрядные напряжения и выборочные стандартные распределения. Для получения каждой точки вероятностной зависимости напряжение прикладывалось 20—30 раз. При определении среднего значения разрядного напряжения и среднеквадратичного отклонения при 50 гц напряжение прикладывалось 20 раз. При воздействии коммутационной волны с фронтом 2 700 мксек находилась вероятность пробоя промежутка от амплитуды воздействующего напряжения при положительной и отрицательной полярностях. Для получения каждой точки вероятностной зависимости напряжение прикладывалось 50 раз.

Испытания сопровождалась регулярными измерениями температуры, давления и абсолютной влажности воздуха. Результаты приводились к нормальным условиям по плотности воздуха в соответствии с ГОСТ 1516-60, абсолютная влажность за время опытов менялась от 2,0 до 5,0 г/м³.

При обработке результатов были использованы вероятностно-статистические методы. Предполагалось, что зависимость вероятности пробоя промежутка от амплитуды воздействующего напряжения следует нормальному закону распределения.

50-% разрядные напряжения и выборочные стандарты распределения координирующих промежутков приведены на рис. 1. Там же указаны средние разрядные напряжения и среднеквадратичные отклонения для этих промежутков при плавном подъеме напряжения промышленной частоты.

Как видно из рис. 1, при всех рассмотренных видах воздействующего напряжения, 50-% разрядные напряжения промежутков растут практически линейно с увеличением расстояния. Выборочный стандарт распределения вероятности разряда при импульсных воздействиях обеих полярностей для всех трех промежутков не превышает 2,5%, а при плавном подъеме напряжения промышленной частоты — 3,3%.

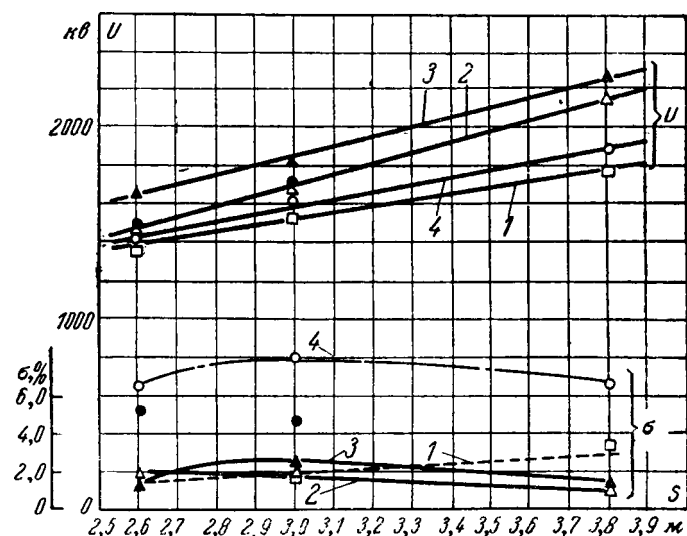


Рис. 1. 50-% разрядные напряжения U и выборочные стандарты распределения координирующих промежутков σ при различных расстояниях между электродами.

1 — плавный подъем, 50 гц, □; 2 — импульсная волна 1,5/40 мксек, положительная полярность, △; 3 — импульсная волна 1,5/40 мксек, отрицательная полярность, ▲; 4 — коммутационная волна с фронтом 2 700 мксек, положительная полярность, ○, коммутационная волна с фронтом 2 700 мксек, отрицательная полярность, ●.

Поскольку 50%-разрядные напряжения изменяются с длиной промежутка практически линейно, зависимость разрядного напряжения в kB_{\max} от размера S координирующего промежутка в метрах для диапазона 2,5—4,0 м, может быть представлена в следующем виде:

$$U_{50\%+1,5/40} = 120 + 520S, \sigma = 2,0\%; \quad (1)$$

при импульсной волне 1,5/40 мксек положительной полярности,

$$U_{50\%-1,5/40} = 420 + 465S, \sigma = 2,5\%; \quad (2)$$

при импульсной волне отрицательной полярности,

$$U_{cp} = 550 + 315S, \sigma = 3,3\%; \quad (3)$$

при плавном подъеме напряжения промышленной частоты,

$$U_{k50\%} = 515 + 355S, \sigma = 8,0\% \quad (4)$$

при коммутационной волне положительной полярности с фронтом 2700 мксек.

Как видно из приведенных результатов, наименьшее пробивное напряжение наблюдается при плавном подъеме напряжения 50 гц. 50%-разрядное напряжение промежутков $S = 2,6$ —3,8 м при коммутационной волне положительной полярности выше, чем при 50 гц на 5—6%, а при отрицательной полярности — на 9—11%. 50%-импульсное пробивное напряжение при положительной полярности выше, чем среднее разрядное напряжение при 50 гц на 8—9%, а при отрицательной полярности — на 20%.

Проведенные испытания показали, что влияние отходящих проводов и шлейфа сравнительно невелико. Так для промежутка $S = 3,8$ м пробивное напряжение при их отсутствии снижается при 50 гц на 5%, 50%-импульсное при положительной полярности — на 3%, а при отрицательной полярности оно практически не меняется. Вольт-секундные характеристики (верхние огибающие) координирующих промежутков приведены на рис. 2.

При выборе размеров сферы на концах электродов было установлено, что при диаметре сферы 150 мм видимая корона появляется при напряжении 435 $kB_{эфф}$, что практически соответствует рабочему фазному напряжению для класса 750 кВ. Увеличение диаметра сферы до 250 мм позволяет повысить напряжение возникновения короны до 590 $kB_{эфф}$, причем разрядные характеристики промежутка при этом не меняются. Проведенные расчеты показали, что диаметр сфер может быть взят 200 мм, в этом случае корона будет появляться лишь при напряжении выше максимального рабочего на величину порядка 5%.

Если на подстанциях 750 кВ будет установлено два разрядника, промежуток должен ограничивать 50%-импульсное разрядное напряжение до величины 2500 кВ. Все рассмотренные координирующие промежутки имеют 50%-импульсное разрядное напряжение ниже 2500 кВ, однако необходимо, чтобы промежуток не только ограничивал волну с линии, но не сбрасывал при коммутационных перенапряжениях. Этим требованиям отвечает промежуток длиной 3,0 м.

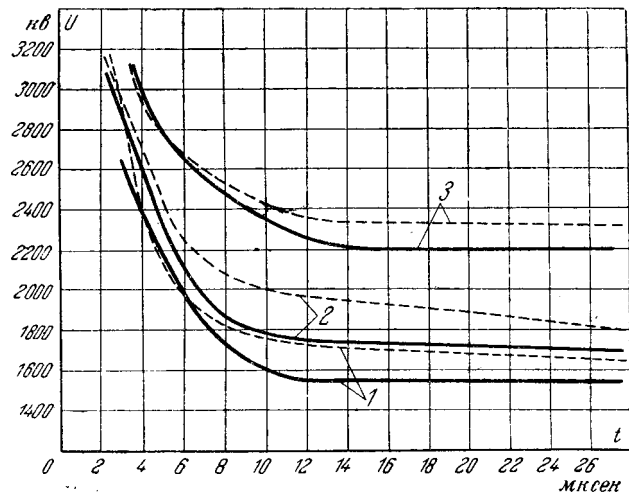


Рис. 2. Вольт-секундные характеристики координирующих промежутков при волне 1,5/40 мксек.

1 — $S = 2,6$ м; 2 — $S = 3,0$ м; 3 — $S = 3,8$ м.

— — — положительная полярность; — — — отрицательная полярность.

Выводы. 1. Может быть сконструирован простой и достаточно надежный координирующий промежуток для установок 750 кВ. Такой промежуток позволяет ограничить возможные воздействия волн атмосферных перенапряжений и облегчить требования к разряднику.

2. Промежуток может быть выполнен при помощи электродов в виде труб, закрепленных на натяжной гирлянде. На концах трубчатого электрода устанавливаются сферы диаметром порядка 200 мм, препятствующие возникновению короны при рабочем напряжении. Если на подстанции 150 кВ установлено два разрядника, размер координирующего промежутка следует брать 3 м.

3. Характеристики координирующего промежутка позволяют выбирать нужное расстояние между электродами таким образом, чтобы ограничить амплитуду набегающей волны грозового перенапряжения, и в то же время избежать их сбрасывания при внутренних перенапряжениях.

Литература

1. Акопян А. А., Панов А. В., Шматович В. В., Ярошенко А. И., Уровни перенапряжений и требования к изоляции в электропередачах 700 кВ переменного тока, «Вестник электропромышленности», 1962, № 2.

2. Волкова О. В., Чернышов В. И., Электрические характеристики защитных промежутков 500 кВ, «Электричество», 1965, № 3.

[26.6.1967]



Прогнозы потребления электроэнергии за рубежом

Доктор техн. наук, проф. Б. А. КОНСТАНТИНОВ

Ленинград

Канд. техн. наук, доц. Г. В. СЕРБИНОВСКИЙ

Москва

За последнее время в зарубежных странах уделяется большое внимание методам прогнозирования потребления различных видов энергии, в том числе электрической.

В соответствии с данными Европейской экономической комиссии ООН основные методы прогнозирования потребления электроэнергии в различных зарубежных странах можно разбить на четыре вида.

Метод, основанный на экстраполяции темпов изменения потребления за прошлые годы. Он носит название метода непосредственной экстраполяции и находит применение как при краткосрочных прогнозах на срок не свыше двух лет, так и для установления среднесрочных и долгосрочных прогнозов. В последнем случае возможны два варианта: первый вариант — использование темпов роста потребления электроэнергии на основании статистических данных за прошлые годы; второй вариант — применение математических формул, которые учитывают эволюционный характер изменений потребления за прошлый период и вероятные изменения этого эволюционного характера в будущем при условии периодических проверок и пересмотров данных, входящих в формулы. Такого рода формула применяется для выражения предполагаемого замедления в будущем темпов роста общего мирового потребления электроэнергии. Эта формула, являющаяся эмпирическим выражением снижающихся темпов роста в зависимости от времени, выражается следующим образом:

$$W = 1\,130 \left(\frac{t - 1\,875}{77} \right)^{4,3},$$

где W — потребление электроэнергии, млрд. кВт·ч;
 t — год, в котором необходимо определить потребление электроэнергии.

Аналогичная формула применялась ранее в Англии

$$W = 58,8 \left(\frac{t - 1\,878}{74} \right)^{4,92}.$$

К общей категории математических экстраполяций принадлежат также попытки применения таких кривых темпа роста потребления электроэнергии, которые имеют точку перегиба, за которой темпы роста медленно снижаются, приближаясь к асимптоте. Однако определение этой точки перегиба связано со значительными трудностями.

Вполне очевидно, что наличие большого количества статистических данных облегчает составление вероятного прогноза. В отдельных странах ряд лет публикуются статистические ряды по потреблению различных видов энергии. Так, напри-

мер, в Соединенных Штатах Америки в «Weekly Coal Report», издаваемом Министерством внутренних дел, публикуются статистические данные о потреблении каждого вида энергии за период времени, достигающий 60 лет.

При пользовании рассматриваемым методом принимаются меры к устранению влияния факторов, не носящих систематического характера. В частности, к таким факторам относятся случайно изменяющиеся метеорологические условия. В то же время в зарубежных странах изучаются в течение ряда лет сезонные колебания потребления энергии, а также зависимости между суточной температурой воздуха и облачностью, с одной стороны, и данными о спросе на энергию, с другой стороны. При этом используются графические методы оценки степени вероятности достижения того или иного уровня спроса на энергию в рассматриваемый период на основании частоты изменений спроса за прошлый период.

Таким образом, при применении метода непосредственной экстраполяции предполагается, что выявленные за прошлый период факторы, влияющие на потребление электроэнергии, будут оказывать такое же воздействие и за рассматриваемый период.

Непосредственную экстраполяцию можно расширять в зависимости от времени и выражать ее в виде индексов потребления электроэнергии с учетом изменения индекса экономической активности, как это делается, например, во Франции.

Метод, основанный на выведенной функциональной зависимости между двумя или несколькими переменными величинами, одна из которых является предметом прогноза. Такой метод носит название метода экстраполяции на основании функциональной зависимости. Его применение зависит от наличия прогнозов в отношении тех переменных экономических величин, изменение которых происходит совместно с изменением потребления электроэнергии. При этом в ряде случаев прогнозы устанавливаются в отношении некоторых выбранных годов, а не в отношении ряда последовательных лет.

Используемые при данном методе экономические показатели при составлении прогнозов можно разбить на следующие группы: I группа — численность населения, численность рабочей силы, занятость в промышленности, часы работы; II группа — общественный продукт, национальный доход, промышленное производство, производство обрабатывающей промышленности, прирост основных фондов (общий или с разбивкой на отдельные секторы); III группа — потребление стали, индексы

сельскохозяйственного производства, индексы жилищного строительства, характерные индексы железнодорожных грузовых или пассажирских перевозок, индексы автомобильного транспорта.

К рассматриваемому методу также относится предложенное во Франции уравнение:

$$C = (1,035)^t \cdot (2,4I + 180),$$

где C — изменение потребления электроэнергии;
 I — уровень промышленного производства;
 t — разница в годах, начиная с 1937 г.

Эмпирические формулы широко используются для прогнозирования роста потребления электроэнергии в будущем, главным образом, в целях общей проверки более подробных прогнозов, установленных для отдельных секторов. При рассматриваемом методе чаще всего устанавливается соотношение между потреблением электроэнергии и уровнем промышленного производства или общественного продукта. Такой метод используется во Франции при составлении плана экономического и социального развития, в Польше, Румынии, Бельгии и Канаде — при составлении прогнозов потребления электроэнергии.

В Румынии, например, применялась следующая формула

$$E = (C_0 + C_1 P) B^t,$$

где E — потребление электроэнергии;
 C_0 и C_1 — индексы стоимости;
 P — экономический показатель, относящийся к 1950 г.;
 B — постоянная величина;
 t — число лет, начиная с 1950 г.

В Канаде для составления прогнозов потребления электроэнергии используются формулы, учитывающие рост валового общественного продукта и занятость населения:

$$E = 310,54 + 0,20093 G$$

(при коэффициенте корреляции 0,99) и

$$\log E = 3,39539 + \log P$$

(при коэффициенте корреляции 0,95),
где E — потребность в энергии в триллионах британских тепловых единиц;

G — валовый общественный продукт, млн. долларов;

P — число гражданских служащих, тыс.

В Бельгии была разработана формула для определения потребления электроэнергии

$$E_t = K I^{0,8} \cdot 2^{\frac{t}{21,5}},$$

где E — потребление электроэнергии;
 I — индекс промышленного производства;
 K — постоянная величина;
 t — время.

К этому же типу относятся формулы, установленные в Бельгии для отдельных секторов потребления электроэнергии:

для различных отраслей промышленности

$$E_i = K_i I^{1,75} \cdot 2^{\frac{t}{200}};$$

для черной металлургии

$$E_s = K_s I^{1,57} \cdot 2^{\frac{t}{47}};$$

для тяги

$$E_T = K_T I^{0,5} \cdot 2^{\frac{t}{42}}.$$

Точность составления прогнозов потребления электроэнергии значительно повышается при наличии детальной экономико-математической модели. В таких моделях делаются попытки установить несколько основных факторов, от которых зависит изменение потребностей в электроэнергии народного хозяйства той или иной страны. Моделями можно пользоваться при установлении краткосрочных или долгосрочных прогнозов потребностей в электроэнергии. При использовании указанных моделей повышение потребности в электроэнергии можно связать с ростом населения и с такими общеэкономическими индексами, как общественный продукт, цены и т. п. В некоторой мере можно учитывать и к. п. д. при преобразовании одного вида энергии в другой и при использовании энергии для конечного назначения.

Таким образом, для применения экономико-математической модели следует установить ряд уравнений, показывающих зависимость между различными категориями энергии, а также между некоторыми из них и ростом экономики.

Так как подобные модели являются по существу статическими, то в них надо довольно часто, не реже 1 раза в год, вносить соответствующие поправки с учетом приобретенного опыта. Одним из примеров использования моделей является экономико-математическая модель, разработанная в Нидерландах для прогнозирования будущих потребностей в энергии. Модель состоит из ряда субмоделей для разных секторов потребления. Каждая субмодель состоит из уравнения, в котором полезное потребление энергии связывается с соответствующими индексами активности, а также нескольких соотношений, показывающих возможность замены одних видов энергии другими. Рассматриваются следующие секторы: а) сектор быта¹; б) сектор промышленности, которая подразделяется на черную металлургию и прочие отрасли промышленности; в) сектор транспорта. Потребление по секторам разбивается на электроэнергию, газ, нефтепродукты и твердое топливо. Ниже приводится субмодель, относящаяся к сектору быта.

В модели приняты следующие обозначения: E_{ht}^H — общее полезное потребление энергии на душу населения; Y_{ht-1} — национальный доход на душу населения в постоянных ценах; T_t — температура; E_t^H — общее полезное потребление энергии; B_t — население; P_{et}^H — доля электроэнергии; P_{gt}^H — доля газа; P_{kt}^H — доля нефтепродуктов; P_{ot}^H — доля твердого топлива;

¹ К сектору быта относятся также торговля, реклама, театры, кино и т. д.

t — время; $\left(\frac{P_0}{P_K}\right)_t$ — соотношение цен на твердое топливо и нефтяные продукты; E_t^H — полезное потребление электроэнергии; g_t^H — полезное потребление газа; K_t^H — полезное потребление нефтепродуктов; O_t^H — полезное потребление твердого топлива.

Модель включает в себя следующие соотношения:

$$\begin{aligned} E_{ht}^H &= f_1(Y_{ht-1}, T_t); \quad E_t^H = B_t E_{ht}^H; \\ P_{et}^H + P_{gt}^H + P_{Kt}^H + P_{Ot}^H &= 1; \quad P_{et}^H = f_2(t, T_t); \\ P_{gt}^H &= f_3(t, T_t); \quad \frac{P_{Ot}^H}{P_{Kt}^H} = f_4\left(\frac{P_0}{P_K}\right)_t; \\ e_t^H &= P_{et}^H E_t^H; \quad g_t^H = P_{gt}^H E_t^H; \\ K_t^H &= P_{Kt}^H E_t^H; \quad O_t^H = P_{Ot}^H E_t^H. \end{aligned}$$

Принимая во внимание различные тенденции изменения потребления отдельных видов энергии, можно установить потребление электроэнергии в будущем, а затем перейти к второй стадии модели, которая устанавливается в виде плана, показывающего потребление электроэнергии и выход продукции.

Метод всесторонних экономических планов. При этом методе учитываются конкретные потребности в электроэнергии на единицу продукции или экономической активности с учетом планируемого производства или планируемой экономической активности в отдельных областях. Как указывается в зарубежных литературных источниках, данный метод в принципе может применяться в странах с плановым хозяйством, так как для его применения необходимо знать, какой уровень развития предусматривается в отдельных взаимосвязанных секторах народного хозяйства. В тех же источниках приводится формула для определения будущего потребления электроэнергии:

$$E = a_0 P_0 b^r t,$$

где a_0 — удельное потребление электроэнергии в базисном году, соответствующее производству P_0 ;

b — коэффициент, в котором учитываются особые факторы, оказывающие влияние на рост потребления электроэнергии;

r — темп роста производства, %;

t — время.

При применении этого метода в тех странах, где не имеется общеэкономической программы развития, в основу берется общеэкономическое прогнозирование, охватывающее целый ряд отдельных предположений по секторам потребления и оценочных данных о потребностях в электроэнергии, в которых делаются попытки предусмотреть развитие рыночной экономики.

Во всех случаях методы экстраполяции служат для проверки долгосрочных прогнозов. В странах, где нет экономических планов, обычно производятся обследования трех видов. Обследования первого рода заключаются в сборе энергетическими пред-

приятиями статистических данных о потреблении электроэнергии промышленными и другими секторами. Обследования второго рода касаются тщательного изучения секторов, потребляющих электроэнергию, причем, наряду с установлением статистических прогнозов в одних областях, в других областях проводятся выборочные и рыночные исследования, проверяется степень насыщенности приборами (например, у бытовых потребителей). Наконец, при обследованиях третьего рода сопоставляется потребность в электроэнергии с индексами общеэкономического роста и результаты сравниваются с конечными выводами предыдущих исследований.

Метод сравнительного международного анализа.

При этом методе будущее развитие потребления электроэнергии оценивается на основе сравнительного исследования одного и того же экономического явления в нескольких странах.

В странах с аналогичной экономической структурой проводятся сравнения долгосрочных и краткосрочных изменений темпов роста потребления электроэнергии и тенденций этого роста даже при неодинаковом уровне удельного потребления. При этом сравниваются: а) потребление различных видов энергии в целом с потреблением электроэнергии на душу населения; б) потребление электроэнергии с потреблением общественного продукта на душу населения; в) потребление различных видов энергии в целом с потреблением электроэнергии на единицу продукции. Сравнительный метод применяется в Австрии и Франции.

Выработка электроэнергии в 1965 г.
европейскими странами и США (Гвт.ч)
(по данным Организации Объединенных Наций)

Страна	Тепло- электро- станции	Гидро- электро- станции	Атомные станции	Прочие электро- станции	Итого
Австрия	6 157	16 046	—	—	22 203
Англия	165 092	4 621	14 037	—	183 750
Бельгия	20 093	272	—	—	20 365
Болгария	8 440	2 005	—	—	10 445
Венгрия	10 903	74	—	—	10 977
ГДР	52 826	785	—	—	53 611
Греция	3 602	759	—	—	4 361
Дания	7 394	*	—	—	7 394
Ирландия	2 626	856	—	—	3 482
Исландия	22	641	—	—	663
Испания	11 093	19 379	—	—	30 472
Италия	30 777	42 367	3 510	2 576	79 230
Люксембург	1 384	917	—	—	2 301
Нидерланды	23 656	—	—	—	23 656
Норвегия	77	48 680	—	—	48 757
Польша	38 836	906	—	—	39 742
Португалия	638	3 982	—	—	4 620
Румыния	16 191	1 011	—	—	17 202
США	956 543	197 002	3 657	189	1 157 391
Турция	2 768	2 169	—	—	4 937
Финляндия	4 502	9 487	—	—	13 989
Франция	52 200	45 435	897	—	98 532
Чехословакия	29 736	4 454	—	—	34 190
Швейцария	491	24 797	—	—	25 288
Швеция	2 662	46 431	—	—	49 093
Югославия	6 540	10 427	—	—	16 967

Примечания: * Данные неверны или отсутствуют.

Нуль или ничтожная величина.

Выработка электроэнергии ФРГ не приводится, так как данные, представленные ООН, относятся к территории ФРГ, а также к Западному Берлину, в отношении которого отдельных данных не имеется (Прим. ред.).
В СССР в 1966 г. выработано 545 млрд. квт.ч.

Приведенные четыре метода составления прогнозов потребления электроэнергии не являются взаимоисключающими. Наоборот, в ряде стран они используются совместно в качестве вариантов для целей проверки и, наконец, для получения компромиссного результата.

Как указывается в зарубежных материалах, все прогнозы должны возобновляться или пересматриваться ежегодно или через регулярные промежутки времени. Следует регулярно давать оценки общей погрешности, допускаемой в каждом прогнозе. В отношении точности результатов желательно систематически сравнивать между собой различные прогнозы, применяемые в разных странах. В тех случаях, когда прогнозы служат, например, основой для разработки программы капиталовложений, целесообразно определять степень вероятности того, что предположительно установленный уровень

спроса на электроэнергию будет достигнут по прошествии определенного промежутка времени.

Для улучшения методов прогнозирования в зарубежной литературе предлагается обратить внимание на увеличение количества, улучшение качества и международной сопоставимости основной статистической и прочей информации, используемой для прогнозирования, а также на опубликование в хронологическом порядке статистических рядов, касающихся различных видов энергии, в том числе и электроэнергии.

Литература

1. Сербиновский Г. В. и Константинов Б. А., Определение потребления электроэнергии на перспективный период, «Электричество», 1957, № 1.

2. Методы и принципы установления прогнозов потребностей в энергии, Европейская экономическая комиссия Организации Объединенных Наций, 1964.

[9.6.1967]

УДК 621.3.027

О международной шкале стандартных напряжений электрических сетей

Канд. техн. наук Л. А. СОЛДАТКИНА

Вопросу стандартизации номинальных напряжений электрических сетей в настоящее время уделяется большое внимание. В начале 1967 года Технический комитет № 8 (ТК8) Международной электротехнической комиссии (МЭК), занимающийся вопросами токов, напряжений и частот, выпустил 4-е издание работы «Публикация 38. Стандартные напряжения МЭК», которая подытоживает почти 10-летнюю работу ТК8 совместно с рабочими группами этого Комитета в отдельных странах (всего в обсуждении данного материала приняла участие 21 страна).

В Публикации 38 даны значения номинальных напряжений для электрических сетей и включены соответствующие значения высших напряжений для электрооборудования. Вся шкала стандартных напряжений МЭК разделена на пять таблиц. В таблицах I и II даны значения напряжений в пределах от 100 до 1000 в для однофазных и трехфазных сетей соответственно.

Таблица II Публикации 38. Стандартные значения номинальных напряжений для трехфазных сетей с напряжениями от 100 до 1000 в включительно.

Серия I, в	Серия II, в
220/380	120/208 240/415 277/480
500	600
660	

В примечаниях к этой таблице указано, что напряжения 500, 600, 660 и 277/480 в не должны использоваться для коммунальных распределительных сетей.

Серия I относится здесь и в следующих таблицах к системам с частотой 50 и 60 гц; серия II — к системам с частотой 60 гц в соответствии с североамериканской практикой.

Таблица III содержит напряжения для тяговых сетей. В таблице IV приведены номинальные напряжения электрических сетей общего назначения в диапазоне от 1 до 47 кВ, в таблице V — напряжения свыше 60 кВ. В таблицах IV и V для серии I приведены два ряда значений, отличающихся друг от друга приблизительно на 10%. При этом рекомендуется, чтобы в одной стране использовались значения номинальных напряжений из одного какого-либо ряда.

Таблица IV Публикации 38. Стандартные значения высших напряжений для электрооборудования и номинальных напряжений для трехфазных сетей в диапазоне от 1 до 47 кВ включительно.

Серия I		Серия II	
Высшее напряжение электрооборудования, кВ	Номинальное напряжение сети, кВ	Высшее напряжение электрооборудования, кВ	Номинальное напряжение сети, кВ
3,6	3,3 3	2,75 2,75/4,76 5,5 8,25	2,4 2,4/4,16 4,8 7,2
7,2	6,6 6	5,5/9,52 13,2	4,8/8,32 12
12	11 10	7,92/13,7 8,32/14,5 14,5	7,2/12,5 7,6/13,2 13,2
17,5	— 15	15,5	14,4
24	22 20	25,8	23
		31	27,6
36	33 30	38	34,6
52	47 45	48,3	46

При этом рекомендуется, чтобы в коммунальных электрических сетях не применялись напряжения ниже 10 кВ и чтобы соотношение между двумя смежными напряжениями в каждой стране не было меньше двух.

Таблица V Публикации 38. Стандартные значения высших напряжений для электрооборудования и номинальных напряжений свыше 60 кВ для трехфазных сетей (приведены междуфазные значения напряжений).

Высшее напряжение для электрооборудования, кВ	Номинальное напряжение сети, кВ
72,5	66 69
123	110 115
145	132 138
170	150 161
245	220 230
300	275 287
362	330 345
420	380 400
525	500
765	от 700 до 750

Анализ данных, приведенных в таблицах II, IV и V показывает, что стандартная шкала напряжений СССР (ГОСТ 721-62) имеет значительно меньшее число ступеней и тем выгодно отличается от шкалы стандартных напряжений МЭК, особенно для серии II. Однако в шкалу МЭК не включено напряжение 35 кВ, имеющее широкое распространение в СССР. В связи с этим Национальный Комитет СССР голосовал против 4-го издания Публикации 38 МЭК. В настоящее время вопрос о необходимости включения напряжения 35 кВ снова обсуждается при подготовке 5-го издания Публикации 38.

Следует отметить, что и в других странах — Великобритании, Франции, США и пр., в настоящее время также ведется работа по сокращению шкалы стандартных напряжений. В связи с этим существующие сети с менее распространенными напряжениями постепенно переводятся на другие напряжения. Например, в Великобритании стандартными напряжениями свыше 1 000 В являются следующие значения: 3,3; 6,6; 11; 22; 33; 66; 88; 110; 132; 220; 275; 330; 400 кВ. Для новых установок в качестве предпочтительных значений в стандарте указаны напряжения: 11; 33; 66; 132; 275 и 400 кВ.

При сокращении числа стандартных напряжений в развитых странах учитываются рекомендации МЭК. Однако при этом возникают определенные трудности, связанные прежде всего с фирменными интересами, что обусловлено капиталистической экономикой. В этом отношении обращает на себя внимание положение со шкалой стандартных напряжений в США, в которой имеется очень большое количество номинальных значений (см. таблицу IV для серии II).

Хотя рекомендации МЭК в отношении стандартных напряжений не являются обязательными, очевидно, что соответствие номинальных напряжений электрических сетей шкале МЭК очень важно. Использование в какой-либо стране напряжений, отличающихся от стандарта МЭК, весьма затрудняет ее торговые отношения с другими странами и, в частности, экспорт электротехнической продукции, в котором обычно заинтересованы все развитые страны. Страны с развивающейся промышленностью также ориентируются на шкалу МЭК при развитии своей энергетики. Отсюда следует, что рекомендации МЭК должны учитываться при переработке соответствующих стандартов СССР, а также межнациональных стандартов по линии СЭВ.

Таким образом, в работе ТК8 МЭК по созданию международной шкалы стандартных напряжений имеется немало трудностей. С одной стороны, в соответствии с принципами работы МЭК в области международной стандартизации ТК8 стремится создать стандартную шкалу с возможно меньшим количеством ступеней напряжений. С другой стороны, при этом не всегда могут быть учтены национальные особенности, а также номинальные напряжения, применяемые в различных странах. Поэтому обсуждение вопросов о целесообразности номинальных напряжениях электрических сетей на заседаниях ТК8 проходит весьма остро, и не всегда результаты обсуждения удовлетворяют интересам стран — участников МЭК. В целях более тщательной подготовки материалов с учетом мнений Национальных Комитетов, ТК8 создал специально две рабочие группы, занимающиеся предварительным обсуждением вопросов о стандартизации напряжений от 100 до 1 000 В и свыше 1 000 В соответственно. Для расширения возможностей согласования интересов отдельных стран в 4-м издании Публикации 38 впервые были включены рекомендации по соответствующим значениям высших напряжений для электрооборудования.

При подготовке к следующему 5-му изданию Публикации 38 предполагается, что основное внимание должно быть уделено обсуждению следующих вопросов:

об унификации напряжений до 1 000 В для коммунальных сетей;

о создании специальной таблицы стандартных напряжений для промышленных сетей;

об упорядочении стандартной шкалы в диапазоне 30—50 кВ;

о возможном сокращении числа стандартных напряжений в таблицах IV и V. При этом имеются в виду напряжения серии I. Для серии II вопрос будет рассмотрен после окончания соответствующей работы над шкалой стандартных напряжений в США.

Обсуждение указанных вопросов уже было начато на заседании ТК8 в июле 1967 г. в Праге. Остановимся кратко на имеющихся в настоящее время результатах и возникающих трудностях при решении этих вопросов.

Унификация напряжений до 1 000 В для коммунальных сетей. В приведенной выше таблице II Публикации 38 для коммунальных сетей предусмотрено относительно небольшое число значений стандартных напряжений. Напряжения 120/208 и 277/480 В применяются исключительно в США. Поэтому вопрос о целесообразности оставления их в международной шкале будет рассматриваться отдельно. Два оставшихся значения напряжения — 220/380 и 240/415 В — относительно мало отличаются друг от друга. Поэтому рассматривается вопрос о возможности принятия некоторой единой международной величины напряжения, средней из двух вышеуказанных значений. Основным преимуществом подобной унификации указанных напряжений является существенный экономический выигрыш, получаемый при производстве многочисленных бытовых приборов. Однако при решении этого вопроса возникает много трудностей. С одной стороны, они связаны с нежеланием снижать эффективность работы сетей с более высоким напряжением 240/415 В, а с другой стороны — с экономическими и техническими проблемами, возникающими при переходе от более низкого к более высокому напряжению, и прежде всего, из-за необходимости производства и установки нового оборудования. В ходе обсуждения высказывались соображения о том, что с учетом отклонений от номинального напряжения, практически имеющих место, большая часть бытовых приборов может работать достаточно эффективно при обоих вышеуказанных напряжениях. Более чувствительными к качеству напряжения являются осветительные и нагревательные приборы.

При обсуждении данного вопроса на заседании ТК8 в Праге большинство делегатов высказалось положительно относительно возможного компромисса между напряжениями 220/380 и 240/415 В, поскольку такой компромисс может быть целесообразным прежде всего для электропромышленности. При этом было отмечено, что переход на новое номинальное напряжение должен производиться постепенно. Предполагается, что с учетом сравнительно небольшого срока службы бытовых приборов (5—10 лет) за счет их морального износа, рассматриваемое изменение напряжения сетей, возможно, не столь сильно затронет интересы потребителей. Было предложено провести специальные исследования относительно условий работы и срока службы различных нагревательных приборов и электродвигателей в бытовых приборах, предназначенных для напряжений 240 или 220 В, но работающих при промежуточных значениях напряжений. В целях продолжения исследований данного вопроса ТК8 поручил одной из рабочих групп рассмотреть возможность нахождения компромисса за счет определения соответствующего соотношения между рабочим напряжением, напряжением на зажимах питающего электрооборудования и номинальным напряжением для электроприемников.

Введение специальной таблицы номинальных напряжений для промышленных сетей на заседании ТК8 в Праге было признано целесообразным. В эту таблицу предложено было включить следующие значения высших напряжений для электрооборудования и номинальных напряжений сетей:

Высшее напряжение для электрооборудования, кВ	Номинальные напряжения сетей, кВ
	0,660
3,6	3,3 3
7,2	6,6 6

Таблица должна быть снабжена примечанием, что она предназначена только для промышленных сетей. Помимо указанных в ней напряжений, для промышленных сетей могут использоваться любые другие напряжения, приведенные в таблицах I, II, IV и V. Соответственно из таблицы II должны быть исключены значения напряжений 500, 600 и 660 В.

В целях упорядочения стандартной шкалы напряжений в диапазоне 30—50 кВ была собрана соответствующая информация о протяженности сетей напряжениями 30, 33, 35, 36, 42, 45, 47 и 50 кВ в 19 странах Европы, Азии и Южной Африки. При этом оказалось, что номинальные напряжения 36, 42, 47 и 50 кВ для электрических сетей практически не применяются. Дальнейшее развитие электрических сетей напряжением 30 кВ не предполагается, так как существующие

сети этого напряжения в дальнейшем должны переводиться постепенно на другие напряжения. Наибольшее распространение имеют сети напряжением 35 кВ — в СССР (протяженность более 100 000 км), Чехословакии, Венгрии и Румынии. Следующее место по протяженности занимают сети напряжением 33 кВ (применяется в 6 странах, суммарная протяженность около 80 000 км).

Таким образом, приведенные в таблице IV Публикации 38 МЭК значения высших напряжений для электрооборудования и номинальных напряжений сетей в рассматриваемом диапазоне не отвечают фактическому положению вещей. В ней указаны напряжения 30 и 47 кВ, которые практически не предполагается применять в дальнейшем, и напряжение 45 кВ, которое имеет ограниченное распространение только в скандинавских странах. В то же время наиболее распространенное напряжение 35 кВ, сети которого имеют наибольшую протяженность, не включено в стандартную шкалу МЭК. При этом следует отметить, что Национальный Комитет СССР уже многократно обращал внимание ТК8 на ненормальность создавшегося положения и ставил вопрос о необходимости введения в шкалу МЭК напряжения 35 кВ.

После длительных обсуждений вопроса о необходимости введения напряжения 35 кВ в шкалу МЭК было принято решение о введении в таблице IV строки — 38, 33, 35 кВ вместо строки 36, 33, 30 кВ.

Вопрос о возможном сокращении числа стандартных напряжений в таблицах IV и V также рассматривался на заседании ТК8 в Праге. Предварительное выяснение мнений Национальных Комитетов ТК8 показало, что практически во всех странах электрические сети напряжениями 15 и 150 кВ не предполагается интенсивно развивать. Кроме того, имелось предложение исключить из таблицы IV напряжения 47 и 45 кВ. Скандинавские страны возражали на заседании ТК8 против исключения напряжения 45 кВ.

После обсуждения указанных вопросов было решено, что в стандартной шкале ряд менее желательных величин следует заключить в скобки. При этом в примечании к таблицам IV и V должно быть указано, что эти напряжения не являются рекомендуемыми, но могут применяться при развитии существующих сетей. Это решение является дальнейшим шагом в деле упрощения шкалы номинальных напряжений МЭК. К числу напряжений, которые не должны быть рекомендованы, было решено отнести следующие значения высших напряжений для электрооборудования: 17,5; 52 и 170 кВ (и соответствующие значения номинальных напряжений электрических сетей).

Таким образом, окончательно для дальнейшего обсуждения Национальными Комитетами таблицы IV и V (в пределах до 220 кВ) в 5-м издании Публикации 38 было предложено представить в следующем виде:

№ таблиц	Высшее напряжение для электрооборудования, кВ	Номинальные напряжения электрических сетей для серии I, кВ	
IV	12	11	10
	(17,5)	—	15
	24	22	20
	38	33	35
	(52)	—	45
V	72,5	69	66
	123	115	110
	145	138	132
	(170)	161	150
	245	230	220

В приведенном виде таблицы IV и V в значительной мере учитывают интересы СССР. Перед Национальным Комитетом СССР в МЭК теперь стоит задача добиться окончательного утверждения принятого предварительного решения.

Помимо подготовки 5-го издания Публикации 38 МЭК в дальнейшем ТК8 предполагает начать разработку рекомендаций по выбору целесообразных ступеней напряжений, которые следует применять в одной стране. Предполагается также начать изучение вопроса о допустимых отклонениях от номинальных напряжений и других показателях, характеризующих качество электрической энергии.

Поскольку выбор стандартных напряжений в международной шкале в ряде случаев обуславливается не столько технико-экономическими соображениями, сколько исторически сложившимся положением в ряде стран, необходимо проводить дополнительные научно-исследовательские разработки в этой области. Это особенно важно для определения наивыгоднейших значений высших напряжений для сетей различных назначений. В настоящее время такие работы уже проводятся в ряде стран.



Из истории электротехники

УДК 621.311.2(091)

Первая в России центральная электростанция переменного тока

Г. Д. ПОЛИЗО

Промышленный тип трансформатора переменного тока был создан венгерскими электротехниками К. Циперновским, М. Дери и О. Блати в 1885 году. Имеются сведения о том, что в том же году трансформаторы «ZDB» были успешно использованы в системе электрического освещения Севастопольской верфи Русского Общества пароходства и торговли¹.

Дальнейшая судьба применения трансформаторов в России связана с сооружением нового городского театра в Одессе. Для решения вопроса о том, какая из систем электрического освещения наиболее подходит для первоклассного театра, был приглашен профессор Новороссийского университета Николай Алексеевич Умов. В обстоятельном докладе эксперта

«О различных системах электрического освещения лампочками каления», состоявшемся 7 января 1886 года, было уделено внимание и трансформаторам. Дав высокую оценку перспективам использования этого недавнего изобретения, Н. А. Умов предложил соорудить не локальную осветительную установку в театре, а центральную электрическую станцию и подключить к ней театр.

Идея сооружения ЦЭС вызвала большой интерес в технических и коммерческих кругах Одессы. Устраивала она также и театральную комиссию, т. к. опасения «... что установка машин у самого театра может повлечь за собою большие неудобства неизбежным шумом и сотрясанием, а также распространением дыма» отпадали сами собой.

Фирма «Ганц и К°» предложила построить электростанцию такой мощности, чтобы она могла помимо 1412 ламп в 16 свечей, 504 лампы в 50 свечей и 12 дуговых фонарей,

¹ В статье используются выдержки из документов, находящихся в Одесском областном государственном архиве (ООАГ).

установленных в театре, питать еще 550—600 ламп частных абонентов; соорудить воздушную линию электропередачи от ЦЭС до театра; оборудовать последний понижающей трансформаторной подстанцией и внутренней системой электрического освещения и осветить дугowymi фонарями притеатральную площадь.

Экономический анализ показал принципиальную выгоду для города предложения фирмы. В декабре 1886 года городская дума принимает это предложение, а уже 19 февраля 1887 года с фирмой «Ганц и К°» заключается соответствующий договор. Сроком готовности всех предусмотренных договором сооружений было назначено 1 сентября 1887 года.

Сооруженная в указанный срок электростанция размещалась на окраине города (ныне ул. Комсомольская, дом № 10). Ее фундаментальное каменное здание состояло из двух помещений — котельного и машинного отделений, общей площадью 350 м². В котельном отделении ЦЭС имелось 4 паровых водотрубных котла общей производительностью 5 т пара в час при давлении 10 атм, а в машинном отделении — 2 «паросветовых» установки заводов «Ганц и К°». Электрическая мощность двух генераторов с самовозбуждением составляла 160 квт при напряжении на клеммах 2 кв и частоте 50 гц. Генераторы были оснащены устройствами, состоявшими из «компенсаторов» и проволочных реостатов, включенных в цепи возбуждения, автоматически поддерживавшими в сети расчетное напряжение. Энергия с генераторов поступала на распределительный щит, а отсюда — в воздушную линию электропередачи длиной 2,5 км, соединявшую ЦЭС с городским театром. Линия электропередачи состояла из двух самостоятельных цепей, каждая из которых имела 2 голых медных провода сечением по 30 мм², подвешенных к деревянным столбам высотой 8,5 м через фарфоровые изоляторы.

На трансформаторной подстанции театра мощностью 120 квт, понижавшей напряжение с 2 кв в питающей линии до 56 в в осветительной сети, было установлено 2 группы по 8 параллельно включенных трансформаторов.

1 октября 1887 года ЦЭС была пущена в регулярную эксплуатацию. Если не считать театр, то наиболее крупным из первых ее абонентов была гостиница «Гранд-отель» (ныне ул. Пастера, дом № 29), где было установлено 300 ламп накаливания.

Для приемки всего сооруженного подрядчиком была организована комиссия, в которую вошли в качестве экспертов профессор Н. А. Умов и старший механик Одесского телеграфа В. Ф. Дидрихсон. Активное участие в работе комиссии принимали заведующий электростанцией И. Д. Новинский и главный представитель фирмы, известный венгерский электротехник М. Дери. В своем заключении Н. А. Умов касается, главным образом, тех сторон новой системы электрического освещения, которые были тогда еще неизвестны: степени опасности воздушной линии электропередачи высокого напряжения для обслуживающего персонала и населения города, стабильности напряжения во вторичной цепи трансформаторов и защиты всей системы от перегрузки и атмосферного электричества.

Н. А. Умовым совместно с М. Дери проводились испытания новой системы на падение напряжения и степень изоляции цепей высокого напряжения. Заключительным этапом работы А. Н. Умова были фотометрические измерения в театре, проведенные им со scrupulousностью физика-экспериментатора, классические опыты которого вошли в историю физики.

В своем заключении ученый констатирует: «Остановившись затем на общем плане электрического освещения городского театра, я нахожу его вполне образцовым и правильным».

В. Ф. Дидрихсон, приведя в своем заключении результаты исследования трансформаторов, а также влияния переменного электромагнитного поля на работу телефонной связи, дал положительную оценку всей системе. В то же время, выполняя функции официального представителя властей, он не мог не обратить внимание на то, что при сооружении этой установки некоторые положения «Временных правил канализации электрического тока большой силы и устройства проводов и прочих приспособлений электрического освещения», утвержденных Министерством внутренних дел 12 августа 1885 года, были обойдены.

Убедительные разъяснения, касающиеся чрезвычайно важного с формальной стороны замечания, давал И. Д. Новинский. В. Ф. Дидрихсон, как и остальные члены комиссии, нашел аргументы, приведенные И. Д. Новинским, достаточно

технически обоснованными и допустил новую установку к эксплуатации.

Пущенные вскоре центральные электростанции постоянно-го тока в Царском Селе, Петербурге и Москве по своей мощности во многих случаях превзошли первую русскую ЦЭС, однако по своему техническому уровню они от нее отставали: удельный расход топлива на Петербургских электростанциях составлял 3,9—5,4 кг/квт·ч, на Московской электростанции он был и того выше,² в то же время на Одесской ЦЭС он находился в пределах 3,4 кг/квт·ч.

Высокий технический уровень Одесской электростанции способствовал установлению сравнительно низкого тарифа на отпускаемую ею электроэнергию. Плата за шестнадцатисвечевой лампо-час в Одессе составляла 2,5 коп., а в Петербурге — 3,5 коп. Столь значительное снижение платы за электроэнергию оказалось возможным несмотря на то, что доставка сюда английского угля повышала его стоимость до 19 коп. за пуд, в то время как в Петербурге он обходился в 16—17 коп. Низкая отпускная цена на электроэнергию Одесской ЦЭС все же обеспечивала ей высокую доходность: прибыль за первый год эксплуатации электростанции превысила 5 000 руб.

Совершенная схема и высокие технико-экономические показатели первой русской центральной электростанции переменного тока возбудили к ней интерес за границей. В связи с проектом централизации электроснабжения г. Вены бургомистр столицы Австро-Венгрии обратился в Одесское градоначальничество с запросом об опыте работы Одесской ЦЭС.

Ответ на этот запрос был направлен 3 августа 1888 года через Генерального консула России в Вене. Положительный опыт 9 месяцев эксплуатации Одесской системы электроснабжения с трансформаторами, изложенный в письме из России, сыграл определенную роль в том, что через некоторое время в Вене было принято решение соорудить ЦЭС переменного тока. В начале 1889 года эта электростанция уже строилась.

Выступая 3 марта 1889 года в VI (электротехническом) отделе РТО в Петербурге на дискуссии по проблемам применения трансформаторов России, доцент Рижского политехнического института Н. М. Озмидов сообщил о полугодовом положительном опыте работы Одесской электростанции переменного тока.

Через три дня после этого интересного сообщения Н. М. Озмидова в адрес Одесского отделения РТО было направлено письмо, подписанное первым председателем VI отдела Ф. К. Величко. В письме говорилось:

«VI отдел ... нуждается в возможно более подробных и обстоятельных сведениях о состоянии и действии электрического освещения в Одессе посредством трансформаторов, при этом желательно было бы узнать насколько хорошо и постоянно это освещение, насколько оно безопасно, часты ли случаи погасания и были ли какие несчастия с рабочими или с публикой».

Подготовленный И. Д. Новинским ответ на запрос из Петербурга является первым техническим отчетом об опыте эксплуатации трансформаторов переменного тока в России. В отчете с большой подробностью описывается Одесская установка, расматриваются принципы трансформации тока и способы его передачи. Подробному анализу подвергается также вопрос надежности линий электропередачи высокого напряжения и требования к их устройству.

Есть все основания предполагать, что после получения отчета И. Д. Новинского VI отделом РТО из опыта эксплуатации Одесской электростанции были сделаны выводы, снявшие последние сомнения в целесообразности применения «системы трансформаторов» в России.

Перестройка во взглядах на систему электроснабжения с трансформаторами не заставила себя долго ждать. Уже в следующем 1890 году в Царском Селе была открыта станция переменного тока напряжением 2 кв, обеспечивавшая вскоре освещение этого города, впервые в Европе, исключительно электричеством. В 1892 году была пущена в эксплуатацию центральная электростанция переменного тока Выборской стороны в Петербурге, а в 1894 году там же образована центральная электростанция инженера Н. В. Смирнова на Васильевском острове.

Дальнейшая судьба использования трансформаторов в России связана с опытом эксплуатации первой русской центральной электростанции переменного тока. Одесская ЦЭС, пущенная в эксплуатацию в 1887 году, сыграла заметную роль в освоении техники переменного тока в нашей стране.

² Каменецкий М. Д., Первые русские электростанции, Госэнергоиздат, 1951.

К ВОПРОСУ О ЦЕЛЕСООБРАЗНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

(Статья И. А. Сыромятникова, «Электричество», 1966, № 11)

Доктор техн. наук К. К. БАЛАШОВ и инж. А. Э. ПЛОТНИККИ

Одесский политехнический институт

Повышение экономичности электрических сетей — одна из важнейших задач, стоящих перед электроэнергетикой. Интересен подход к этому вопросу в рассматриваемой статье, где исследуются преимущества, получаемые от уменьшения сопротивления в электрических сетях.

Некоторые технические показатели работы распределительной сети (потерю напряжения в нормальном режиме и колебания напряжения при самозапуске электродвигателей) И. А. Сыромятников выразил через величины мощности короткого замыкания и отношения реактивной мощности нагрузки при номинальном режиме к мощности короткого замыкания

$$\left(Q \frac{Q_n}{S_{к.з}} \right).$$

Такой вид зависимостей в ряде случаев весьма удобен, так как мощность короткого замыкания характеризует электрическую удаленность точек схемы электроснабжения от источника питания. Вопрос об определении оптимальных значений токов короткого замыкания в распределительных сетях тесно связан с вопросом о выборе величины напряжения короткого замыкания U_k в трансформаторах.

В Одесском политехническом институте были проведены исследования в области определения оптимальных значений U_k для трансформаторов распределительных сетей. Для этого на ЭЦВМ была выполнена серия расчетов трехфазных трансформаторов различных мощностей по программе, составленной на базе [Л. 1].

В таблице приведены в качестве примера расчетные годовые затраты (в руб. и в %) для оптимальных вариантов трансформаторов с классом изоляции 110 кВ, причем за 100% приняты затраты, соответствующие стандартному значению U_k .

Из таблицы следует, что для рассматриваемых трансформаторов экономически целесообразным является некоторое снижение U_k относительно стандартного. Поэтому принятие рекомендаций, содержащихся в статье И. А. Сыромятникова, в части уменьшения U_k для некоторых групп трансформаторов может дать положительный народнохозяйственный эффект не только в результате преимуществ, получаемых от уменьшения сопротивления системы, но и благодаря некоторому уменьшению затрат на трансформацию электроэнергии.

Очевидно, что оптимальное значение тока короткого замыкания в распределительных сетях должно находиться в зависимости от мощности электрической сети, т. е. от мощности питающих эту сеть трансформаторов, что и определяет наиболее вероятные сечения кабельных линий, выбранных по условию рабочего режима.

Будем исходить из условия применения в распределительных сетях 6—10 кВ выключателей с предельным током отключения 20 кА.

Чтобы избежать чрезмерного завышения сечений кабелей по условию допустимого нагрева их при коротких замыканиях

(особенно в сетях 10 кВ), нужно величину U_k выбирать таковой, чтобы ток короткого замыкания за каждым из двух отдельно работающих трансформаторов не превышал 10 кА. Это должно предопределить выбор сечения кабелей.

Исходя из указанных соображений, оказывается целесообразным в ряде случаев уменьшить величину U_k в трансформаторах более, чем на 20% против ГОСТ. Однако иногда имеет смысл и увеличивать значение U_k . Так, исполнение трансформатора мощностью 25 МВА и напряжением 110/6,3 кВ на величину $U_k = 12,5\%$ вместо 10% по стандарту должно привести к уменьшению мощности короткого замыкания на шинах 6 кВ до 200 МВА, что позволяет отказаться от применения реакторов.

Повышение токов короткого замыкания при снижении U_k потребует увеличения электродинамической прочности обмоток трансформаторов.

Выводы. 1. Поставленный в обсуждаемой статье вопрос о необходимости определения оптимального значения тока короткого замыкания в распределительных сетях представляет большой интерес и является актуальным. Хочется надеяться, что проблема эта будет исследована коллективом учеников и последователей проф. И. А. Сыромятникова.

Напряжение короткого замыкания U_k , %			5	7,5	10	15	20
Расчетные годовые затраты	Трансформатор 6300/110	руб.,	3 248	3 216	3 252	3 437	3 653
		%	99,9	98,9	100	105,7	112,3
	Трансформатор 10000/110	руб.,	4 560	4 496	4 568	4 852	5 176
		%	99,8	98,4	100	106,2	113,3
	Трансформатор 25000/110	руб.,	8 972	8 909	9 103	9 743	10 533
		%	98,6	97,9	100	107,0	115,7

2. При решении этой проблемы должен быть изучен вопрос о пересмотре нормированной величины напряжения короткого замыкания трансформаторов. Полученные в Одесском политехническом институте результаты исследований в области установления оптимальных значений U_k трансформаторов могут быть полезными при выполнении этой работы.

Литература

1. Балашов К. К., Комплексный технико-экономический метод проектирования трансформаторов, «Электричество», 1963, № 4.

2. Манькин Э. А., Левицкая Е. И., Лурье С. И., Мильман Л. И., Итоги исследований электродинамической прочности трансформаторов и дальнейшее направление работ, Материалы Всесоюзной научно-технической конференции «Современное состояние отечественного трансформаторостроения и перспективы его развития», Запорожье, 1966.



ПРОФЕССОР ВИКТОР МИХАЙЛОВИЧ СИНЬКОВ

(К 60-летию со дня рождения и 40-летию производственной деятельности)

29 августа 1967 г. исполнилось 60 лет со дня рождения и 40 лет производственной, научной и педагогической деятельности заведующего энергетическим отделом Института автоматики (г. Киев), доктора технических наук, профессора Виктора Михайловича Синькова.

Окончив в 1929 г. Киевский электротехнический институт имени В. И. Ленина и имея уже некоторый опыт проектирования и монтажа электротехнических установок, В. М. Синьков начал работать дежурным инженером Киевэлектростроя, впоследствии Киевской ТЭЦ-2, где он занимал должности начальника технического отдела и начальника машинного цеха.

В 1933 г. В. М. Синьков был переведен в Киевскую контору Теплоэлектропроекта и вскоре назначен начальником электросектора. Под его руководством были выполнены проекты электрической части Киевской ТЭЦ-2 (второй и третьей очереди), Николаевской и Одесской ТЭЦ и других станций и подстанций.

В 1937 г. В. М. Синьков приглашен в Уральский политехнический институт имени С. М. Кирова. Здесь в 1939 г. ему присвоено ученое звание доцента и он назначается заведующим кафедрой электрических станций, сетей и систем. В апреле 1941 г. В. М. Синьков успешно защитил кандидатскую диссертацию. В период Великой Отечественной войны кафедра вела исследования по нескольким темам специального характера.

В 1945 г. под руководством В. М. Синькова впервые в Советском



Союзе при Уральском политехническом институте были начаты работы по передаче энергии постоянным током.

Научно-педагогическая работа В. М. Синькова продолжалась в должности заведующего кафедрой электрических станций, сетей и систем Куйбышевского индустриального института и в Украинской сельскохозяйственной академии, где он заведовал кафедрой производства и распределения электроэнергии.

Виктор Михайлович подготовил сотни квалифицированных инженеров. Некоторые из его учеников имеют уже ученые звания и степени и ведут научную и педагогическую работу в институтах Советского Союза.

В период работы в высших учебных заведениях В. М. Синьков поддерживал тесную связь с энергетической промышленностью, выполняя исследовательские работы и проводя консультации и семинары.

В. М. Синьков является одним из пионеров разработки и внедрения специализированных вычислительных устройств для энергетики. Эта работа продолжается им и сейчас в Институте автоматики, где он организовал лабораторию автоматизации энергетических систем и работает начальником отдела автоматизации энергетики.

Под руководством В. М. Синькова разработан и внедряется комплекс специализированных вычислительных устройств для расчета и автоматического ведения наивыгоднейшего режима работы энергетических систем и тепловых электростанций.

В 1966 г. В. М. Синькову была присвоена ученая степень доктора технических наук, а в 1967 г. — ученое звание профессора. Он является автором свыше 90 печатных работ.

В. М. Синьков в течение многих лет вел активную общественную работу в НТО энергопромышленности в качестве члена правления и заместителя председателя областных правлений в Свердловске, Куйбышеве и Киеве.

Шестидесятилетний юбилей Виктор Михайлович Синьков встречает полным творческих сил и энергии, сочетая свежесть творческой мысли со знаниями зрелого ученого.

Группа товарищей

ПРОФЕССОР А. К. ДАРМАНЧЕВ

После продолжительной тяжелой болезни на 72-м году жизни скончался Алексей Константинович Дарманчев, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор Ленинградского сельскохозяйственного института.

После окончания в 1925 г. электромеханического факультета Ленинградского политехнического института им. М. И. Калинина А. К. Дарманчев продолжал начатую им с 1916 г. работу в области промышленной энергетики и электротехнического производства. В этот период деятельности А. К. Дарманчевым были разработаны исходные

положения о допустимых пусковых мощностях короткозамкнутых двигателей при различных источниках питания.

Начиная с 1928 и по 1947 г. основным направлением деятельности Алексея Константиновича была крупная электроэнергетика, где он (в системе Ленэнерго) прошел путь от старшего инженера управления Ленинградского электроток до главного диспетчера Ленэнерго. В этой должности он работал с 1935 по 1946 гг., а в 1946—1947 гг. был начальником вновь организованного тогда в Москве объединенного диспетчерского управления энергосистем Центра СССР.

Одновременно А. К. Дарманчев преподавал в вузах и на курсах повышения квалификации инженеров-энергетиков.

В 1945 г. А. К. Дарманчев был награжден орденом Красной Звезды за успешную работу в Ленэнерго во время блокады Ленинграда.

В 1946 г. он приступил к систематической научной работе в качестве старшего научного сотрудника (по совместительству) в Энергетическом институте АН СССР, где проработал до 1960 г. С 1947 г. он окончательно перешел на научную работу в качестве научного руководителя лаборатор-

рии режимов в Научно-исследовательском институте постоянного тока, а затем был назначен заведующим кафедрой производства и распределения электрической энергии в сельском хозяйстве в Ленинградском институте механизации сельского хозяйства. В это же время он работал на кафедре электрических станций и систем Ленинградского сельскохозяйственного института.

Работая в институте, А. К. Дарманчев много сделал для организации учебного процесса по подготовке инженеров-электриков сельского хозяйства, успешно руководил аспирантурой и выполнил ряд научно-инженерных разработок по вопросам электрификации сельского хозяйства.

Итогом огромной творческой работы А. К. Дарманчева по вопросам организации, эксплуатации и управления энергосистемами является выпущенная им в 1960 г. книга «Основы оперативного управления энергосистемами», представляющая единственный в своем роде как в отечественной, так и в зарубеж-



ной литературе капитальный труд. Эта книга явилась его докторской диссертацией.

Общий объем опубликованных работ А. К. Дарманчева превосходит 80 печатных листов.

А. К. Дарманчев, наряду с большой педагогической, научной и инженерной деятельностью, всегда принимал активное участие в работе общественных организаций. Член КПСС с 1947 г., он работал парторгом, членом бюро и секретарем первичной партийной организации. В течение свыше 10 лет был членом бюро секции электрификации сельского хозяйства НТОЭП.

Вся инженерная, научная и педагогическая деятельность А. К. Дарманчева свидетельствовала об его большой эрудиции, широте кругозора и инженерной дальновидности.

Ушел из жизни видный ученый, мудрый воспитатель, замечательный человек.

Светлую память об Алексее Константиновиче Дарманчеве навсегда сохраняют его ученики и товарищи по работе.

Группа товарищей

Библиография

УДК 621.311.4

Н. А. КАЗАК, Б. А. КНЯЗЕВСКИЙ, С. С. ЛАЗАРЕВ
и Д. С. ЛИВШИЦ

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

535 стр., ц. 1 р. 68 к. изд-во «Энергия», 1966

Рецензируемая книга предназначена и утверждена МВ и ССО РСФСР в качестве учебника для высших технических учебных заведений.

В ней впервые в учебной литературе изложены научные основы дисциплины «Электроснабжение промышленных предприятий и городов» на современном уровне ее развития. К таким вопросам, в частности, относятся учет надежности электроснабжения, основанный на некоторых данных статистики повреждаемости основных элементов электрических сетей, оценка неодинаковости напряжения и ущерба от его некачественности, вопросы пуска и самозапуска двигателей, устойчивости режимов узлов нагрузки и некоторые другие.

Книга охватывает большинство вопросов курса электроснабжения; материал за небольшими исключениями расположен в правильной последовательности и изложен хорошим языком. Общему благоприятному впечатлению от книги способствуют приятный внешний вид, удобные для чтения шрифт и формат.

Однако книга содержит и ряд недостатков, которые во многом можно объяснить тем, что она издана впервые.

Прежде всего она заметно выходит за рамки учебной программы курса «Электроснабжение промышленных предприятий». Хотя в предисловии авторы и указывают на то, что ими учтено изложение ряда вопросов в других дисциплинах утвержденного МВ и ССО СССР учебного плана специальности 0303, целый ряд глав учебника все же дублирует это изложение. К таким разделам, например, относятся гл. II, V, VII, VIII, IX, X, XII, XIII, а также некоторые вопросы в других местах книги. Материалы, представленные в перечисленных главах, излагаются в предусмотренных учебным планом специальности курсах «Электрические сети и системы», «Электрическая часть станций и подстанций», «Переходные процессы в системах электроснабжения», «Электрооборудование и электропривод промышленных установок», «Релейная защита и автоматика».

Вместе с тем в книге отсутствует изложение некоторых существенно важных вопросов, входящих в данную дисциплину.

Совершенно недостаточен, например, объем изложения методики технико-экономических расчетов и сравнения вариантов электроснабжения, а также количество числовых примеров в тексте. Отсутствуют также необходимые приложения, как например, укрупненные стоимостные показатели элементов электроснабжения и другие технические данные.

Кроме того, в книге имеется целый ряд повторов и даже прямых противоречий. Например, выбор проводов и кабелей излагается в двух местах (гл. IV и XV), напрев и тепловой износ изоляции — в гл. III и VII; к изложению КРУ авторы также возвращаются в нескольких местах книги, устойчивость режима узлов нагрузки (гл. XI) в некоторой части дублирует вопросы пуска и самозапуска двигателей (гл. XVIII) и т. д.

Обращает на себя внимание различный подход авторов к подбору литературы, в результате чего списки литературных источников по тем главам, где они даны, содержат от 1 до 26 наименований. Вообще, помещенные в конце каждой главы отдельного списка литературы вряд ли можно признать правильным. Это приводит к ненужному многократному повторению одних и тех же наименований наиболее популярных и необходимых изданий, в частности справочников и учебников, и, как следствие, к неоправданному увеличению объема книги.

Рассмотрим теперь более подробно содержание отдельных глав книги, уделив большее внимание тем главам, которые составляют основное содержание дисциплины «Электроснабжение промышленных предприятий».

Глава I «Электроприемники промышленных предприятий» имеет очень важное значение для лиц, впервые приступающих к изучению данного курса. В этой главе дается описание электроприемников, применяемых в основных отраслях промышленности — горнодобывающей, металлургической, машиностроительной и металлообрабатывающей, а также режимов их работы и условий эксплуатации. Здесь приведены данные о единичных мощностях электроприемников, применяемых напряжениях распределительных сетей и некоторые сведения об удельных расходах энергии на основные технологические процессы.

Материал главы изложен просто и понятно, однако, чересчур лаконично.

В гл. II описывается коммутационная и защитная аппаратура напряжением до 1000 в. Наряду с назначением, областью применения и описанием конструкций аппаратуры изложены условия выбора защитных аппаратов, обеспечивающие их надежное действие. Хорошо, что в главе приводятся технические данные аппаратуры и их время-токовые характеристики.

Основным недостатком этой главы, на наш взгляд, является отсутствие числового примера, иллюстрирующего выбор коммутационной и защитной аппаратуры до 1000 в, с проверкой селективности ее действия по приведенным в тексте характеристикам. Без такого примера глава остается несколько декларативной, а приведенные характеристики лишь дублируют справочники, на которые даны ссылки в тексте.

В гл. III излагается расчет нагрузок и выбор трансформаторов цеховых подстанций. Эта глава содержит 60 стр. и является самой большой. По-видимому, это объясняется тем значением, которое авторы совершенно справедливо придают ее содержанию, ставя вопрос определения нагрузок на первое место в числе проблем, возникающих перед инженером при проектировании устройств электроснабжения.

Первые два параграфа, в которых формулируется задача определения электрических нагрузок и приводятся основные величины и коэффициенты, применяемые в расчетах, изложены хорошо и принципиальных возражений не вызывают. Можно лишь заметить, что в качестве учебного материала табл. 3-1 содержит значительное количество излишних обозначений и трактовок.

В § 3 главы излагаются вопросы нагрева проводников электрическим током. Основные положения теории нагрева проводников, изложенные на стр. 73—81, бесспорны. Вместе с тем следовало иметь в виду, что общая теория нагрева токоведущих частей излагается в курсе «Электрические сети и системы». Вряд ли также целесообразно вопросы нагрева и старения изоляции излагать в одной книге дважды: здесь и в гл. VII, применительно к нагреву и износу изоляции трансформаторов.

Наиболее серьезные возражения вызывают § 4—6, посвященные методике расчета нагрузок.

В этих параграфах излагаются два метода расчета нагрузок: метод коэффициента максимума и метод двучленных формул, предложенный Д. С. Лившицем еще в тридцатых годах и ранее широко применявшийся. Несмотря на то, что метод Д. С. Лившица уже не применяется, он изложен весьма подробно, с приведением в табл. 3-7 устаревших формул для групп электроприемников с различным режимом работы. Наряду с этим, дав в конце стр. 96 критическую оценку методу коэффициента максимума, положенному в основу ныне действующих «Временных руководящих указаний по определению электрических нагрузок промышленных предприятий» (ВрПУ), авторы исключили этот метод из дальнейшего изложения. В результате у читателя, а особенно у студентов, впервые изучающих предмет, может создаться совершенно неверное впечатление о методе коэффициента максимума как о громоздком, неточном и непригодном для использования при расчетах. Практической возможности для объективного сравнения обоих методов читателю не предоставляется, так как в тексте не приведены ни кривые $K_m = f(n_x)$, ни заменяющая эти кривые таблица, имеющаяся во ВрПУ. В то же время в книге ничего не говорится о современном методе расчета нагрузок, который в течение ряда лет является не только общепринятым, но и официально рекомендованным.

Кроме указанных недостатков, по этой главе можно сделать еще одно существенное замечание. В ней имеется попытка продолжить на страницах учебника полемику по поводу методов расчета нагрузок, для чего читатель отсылается к дискуссионным статьям в технических журналах. На наш взгляд, эта попытка ничем не оправдана и неприемлема для солидного учебника.

Выбору трансформаторов цеховых подстанций посвящен последний § 3-7 рассматриваемой главы. Здесь дана классификация типов цеховых подстанций, краткое описание их конструктивных особенностей и области применения. Затем даны общие рекомендации к выбору числа и мощности трансформаторов, вытекающие из обобщения опыта проектирования и эксплуатации.

Изложение на четырех страницах чисто описательного текста всех вопросов, связанных с выбором числа и мощности трансформаторов, представляется совершенно недостаточным.

Этот параграф следовало изложить с позиций технико-экономического сравнения и выбора оптимального числа и мощности трансформаторов в зависимости от типа подстанций, расположения и величины нагрузок, потерь энергии в трансформаторах и электрических сетях.

Главы IV и V посвящены принципам построения схем, расчету цеховых электрических сетей и их конструктивному выполнению. Описание схем сетей напряжением до 1000 в достаточно полно освещает излагаемый вопрос и сопровождается четкими и понятными иллюстрациями. На рис. 4-24, 4-25 приводятся важные и удобные для расчетов кривые потери напряжения в стальных токопроводах разных профилей. Однако приведенные в табл. 4-1 величины допустимого снижения напряжения в силовых сетях вызывают сомнения, так как они не соответствуют нормированным ПУЭ отклонениям напряжения. Схемы электрического освещения описаны достаточно подробно, но это описание не охватывает особенностей питания осветительных установок при использовании напряжения 660 в.

Следовало также более полно изложить особенности расчета цеховых сетей специальных конструкций, в частности — шинопроводов и троллейных линий. Имеющегося здесь единственного числового примера недостаточно, а один из центральных вопросов главы — составление схемы силовой сети цеха — сведен к двум небольшим рисункам 4-29 и 4-30, в основном иллюстрирующим лишь принципы начертания таких схем и применяемые в них графические обозначения. Никакой расчетной методики, кроме упомянутых выше вспомогательных графиков, главы IV и V не содержат. Вместе с тем мы здесь вновь сталкиваемся с дублированием изложения одного и того же материала в двух главах, написанных разными авторами (в данном случае — описание конструкции шинопроводов).

В гл. VI описаны схемы электроснабжения на повышенных напряжениях (6—110 кВ). Здесь изложены принципы построения схем, их надежность, разновидности, а также указаны особенности построения схем при питании от сетей энергосистем и от собственных ТЭЦ. Затем перечислены характерные особенности электроснабжения отдельных отраслей промышленности, оказывающие влияние на выбор той или иной схемы питания предприятий данной отрасли. Здесь же перечислены и способы ограничения токов короткого замыкания.

При всей содержательности этой главы она имеет чисто описательный характер; сопоставление схем и способов ограничения токов короткого замыкания дано лишь в качественном разрезе и не сопровождается количественной оценкой.

Говоря о надежности электроснабжения, автор главы привел очень важную таблицу 6-1 (стр. 167) удельной повреждаемости элементов электроснабжения. Однако вследствие отменного описательного характера главы интересные данные этой таблицы нигде не использованы и она оказалась оторванной от текста главы. К тому же вопросу надежности посвящается специальная гл. XIV, в которой приводится другая аналогичная таблица 14-1 (стр. 400). Следовало бы эти таблицы объединить в одну более полную. Вообще оценку надежности электроснабжения было бы целесообразно сосредоточить в одном месте учебника.

В гл. VII описывается электрооборудование напряжением выше 1000 в.

Несмотря на то, что предмет изложения этой главы относится к дисциплине «Электрическая часть станций и подстанций», в ней приведены некоторые сведения, составляющие специфику данного курса и потому безусловно полезные для изучающих его студентов. К таким сведениям относится изложение перепускной способности трансформаторов и описание установок электрооборудования в условиях загрязненной среды. Авторы поступили правильно, акцентировав содержание гл. VII на этих вопросах.

Приведенные в ней данные и кривые допустимых перегрузок трансформаторов имеют важное значение. Следует, однако, указать, что формула (7-5) аналогична уравнению (3-43), но дана здесь в других обозначениях, что может вызвать у читателя недоумение. Ряд трактовок и терминов, уже объясненных в § 3-3, в этой главе повторяется вновь, кривые нагрева и охлаждения, приведенные на рис. 7-1, повторяют аналогичные графики рис. 3-7 и 3-8. Отсутствие числового примера оставляет формулу восьмиградусного правила нереализованной; студенту останется непонятным, как (в числовой трактовке) влияет повышенная нагрузка трансформатора на срок его службы по тепловому износу изоляции. В этой главе следовало, на наш взгляд, на основе анализа теплового износа изоляции трансформатора дать какие-то рекомендации к мето-

дикое выбора его мощности. Возможно стоило привести результаты этого анализа, полученные на базе современных методов математической статистики.

Главы VIII, IX и X, а также гл. XII и XIII в основном относятся к курсу «Электрическая часть станций и подстанций» и, как уже указывалось, в рецензируемой книге являются лишними. Вместо них следовало бы дать более конкретный материал, отражающий лишь специфику схем и конструкций распределительных устройств, управления, автоматики, релейной защиты, а также особенности расчетов токов короткого замыкания в системах электроснабжения промышленных предприятий.

Глава XIV практикует вопросы надежности электроснабжения. Как уже упоминалось, количественная оценка надежности внесена в учебный курс электроснабжения впервые, что заслуживает безусловного одобрения так как повышает общий научный уровень изложения этой дисциплины.

В начале этой главы в простой и доходчивой форме изложены вопросы применения некоторых основных положений теории вероятностей к оценке надежности, затем приведены необходимые данные об удельной повреждаемости элементов электроснабжения и в заключение дано описание принципов технико-экономической оценки вариантов с различной степенью надежности. В конце главы приводится большой, хорошо подобранный числовой пример расчета.

Принятый порядок изложения нового вопроса в этой главе представляется весьма удачным, так как приведенный числовой пример хорошо иллюстрирует теоретические положения и раскрывает перед учащимися смысл оценки надежности и ее результат.

В этой главе следовало объяснить почему количественная оценка надежности применима лишь для решения вопроса о степени резервирования потребителей II категории (как это и предусмотрено условием числового примера). Приведенные на рис. 14-5 кривые непонятны и не согласуются с поясняющим текстом.

Можно выразить сожаление о недостаточном объеме этой интересной и содержательной главы.

Название гл. XV «Выбор сечений проводов питающих сетей» не отвечает ее содержанию, так как в ней излагается методика выбора сечений проводов только по экономической плотности тока. Главу следовало бы назвать иначе и, конечно, поместить ее не в конце, а в первой половине книги. Тогда целый ряд вопросов, трактуемых в других главах учебника с позиций расчетных затрат, получил бы свое своевременное обоснование.

В выражение расчетных затрат (15-9) не внесено слагаемое, отражающее стоимость установленной мощности в системе на покрытие потерь. Не указано, какой следует принимать стоимость потерянной энергии в формуле (15-8). Содержание главы представляется также обедненным отсутствием в ней хотя бы приближенных данных о числовых значениях коэффициентов, входящих в выражения капитальных и расчетных затрат (15-7) и (15-9), а также отсутствием какого бы то ни было числового примера.

Следовало, конечно, привести нормы экономических плотностей тока по ПУЭ. Хотя критика этих норм на стр. 416 по существу и справедлива, однако нормы являются действующими и широко применяются до сих пор.

Глава XVI посвящена вопросам компенсации реактивной мощности. Эта глава занимает в книге второе (после гл. III) место по объему (54 стр.). Важность вопросов, трактуемых в главе, для промышленного электроснабжения трудно переоценить. Авторский коллектив поступил правильно, выделив для их изложения достаточный объем.

Прежде всего заметим, что название главы не охватывает содержания как изложенных в ней вопросов, так и вопросов, которые в ней следовало бы дополнительно изложить. Ведь говоря о коэффициенте мощности промышленных предприятий, мы имеем всегда в виду его повышение не только с помощью частичной компенсации реактивной мощности, но и прежде всего — путем сокращения потребления последней. В главе правильно уделяется много внимания применению синхронных двигателей, обеспечивающих наиболее экономичный путь сокращения потребления реактивной мощности. Вместе с тем другие способы повышения естественного коэффициента мощности (уменьшение холостых ходов оборудования, повышение качества ремонта и т. д.) не получили в ней должного отражения.

Кроме того, в этой главе, к сожалению, не отражена общеизвестная зависимость уровня напряжения от степени компенсации

сакции реактивной мощности на данной ступени трансформации. В результате создается впечатление, что эти вопросы могут рассматриваться отдельно. Такому впечатлению способствует и то, что в следующей главе, специально посвященной режимам напряжения, об этом также почти ничего не говорится. Раздельное изложение двух этих взаимно связанных вопросов с методической точки зрения не оправдано.

Одно из последствий такого разделения проявилось в том, что в обеих главах (XVI и XVII) применение продольной компенсации практически игнорируется. Между тем такая компенсация находит себе все более широкое применение в сетях с толчковыми нагрузками, например, в сварочных, в сетях нефтепромысловых установок и некоторых других, о чем лишь бегло упоминается на стр. 491.

В то же время ряд вопросов главы изложен чересчур подробно. В качестве примера можно привести вывод формул (16-20) и (16-22), оценивающих удельный расход активной мощности на компенсацию в синхронном двигателе и занимающий четыре страницы текста, а также изложение на десяти страницах аналитического и графического методов распределения конденсаторов в электрических сетях. Вот здесь было бы уместно сократить изложение и отослать читателя для более подробного ознакомления с этими вопросами к специальной литературе.

Наконец, следует отметить, что авторы исключили из этой главы понятие экономической эквивалента реактивной мощности, не предложив ничего взамен.

Глава XVII, по нашему мнению, одна из самых содержательных в книге и представляет большой интерес. В ней рассматриваются режимы напряжения в распределительных сетях. Здесь устанавливается связь между отклонениями и потерями напряжения, рассматриваются потери напряжения в трансформаторах и способы выбора «добавок» к коэффициентам трансформации. Важное значение имеет § 17-5, в котором определены расчетные значения потери напряжения в зависимости от допустимого отклонения.

Центральным в главе является § 17-6 «критерии качества напряжения». Автор главы хорошо справился с задачей изложения нового материала, приводимого в учебнике впервые и основанного на применении теории вероятностей, в частности нормального распределения.

Однако описание критериев качества напряжения, данное в этом параграфе, не сопровождается хотя бы приближенными рекомендациями допустимой величины неоднородности напряжения для различных условий проектирования, без чего эта методика носит несколько формальный характер. То же самое касается формулы (17-19), характеризующей ущерб от некачественного напряжения в зависимости от коэффициентов K_1 и K_2 , значения величин которых в тексте не приводятся.

В этой главе, как нам кажется, надо было не только изложить режимы напряжения, но и не меньше внимания уделить способам его регулирования и выбору средств последнего. Возможно, что здесь следовало учесть некоторые основные положения из «Руководящих указаний по регулированию напряжения в сетях промышленных предприятий», подготовка которых к изданию во время работы над учебником уже была близка к окончанию. Как и в других разделах учебника, приведенных здесь числовых примеров недостаточно, что снижает методическую эффективность излагаемого материала. В связи с этим хотелось бы высказать в порядке обсуждения следующую мысль.

Многообразие вопросов, излагаемых в дисциплине «Электроснабжение промышленных предприятий» и синтетический характер этого курса делают необходимым приведение в учебниках и учебных пособиях по нему большого числового примера, завершающего текстовую часть изложения. Этот числовой пример должен быть подобран так, чтобы читатели могли бы проследить за всей последовательностью и ходом расчетов, начиная от определения электрических нагрузок, технико-экономического обоснования числа, мощности и расположения подстанций, а также сравнения схем электроснабжения с учетом их надежности и кончая выбором компенсирующих устройств, оценкой качества напряжения и выбора средств его регулирования, составлением сметно-финансового расчета и определением себестоимости электроэнергии.

Учет сделанных в настоящей рецензии замечаний (особенно принципиального замечания по изложению методики расчета нагрузок в гл. III) при последующем переиздании книги, будет, по нашему мнению, способствовать улучшению ее качества.

В. И. КОЛОДЯСКИЙ, канд. техн. наук С. Д. Волобрынский

УКАЗАТЕЛЬ МАТЕРИАЛОВ, ПОМЕЩЕННЫХ В ЖУРНАЛЕ «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»

в 1967 г.

I. ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Автор и название статьи	Номер журн.	Стр.	Автор и название статьи	Номер журн.	Стр.
К 50-ЛЕТИЮ СОВЕТСКОЙ ВЛАСТИ					
Жимерин Д. Г.— Основные этапы электрификации СССР	5	1	Каялов Г. М. и Куренный Э. Г.— Основы расчета колебаний нагрузок в электрических сетях	2	5
Мелентьев Л. А.— Значение топливно-энергетических ресурсов Сибири для формирования Единой электроэнергетической системы страны	6	1	Бойчев Б. Х.— Анализ условия регулирования возбуждения синхронных генераторов в аварийном режиме	2	9
Антонов А. К.— Электротехническая промышленность за 50 лет	7	1	Веников В. А., Никитин Д. В., Штробель В. А. и Рубин В. Б.— Регулирование турбины как средство улучшения переходных процессов электрических систем	2	13
Комаров Д. Т.— Развитие сельской электрификации СССР за 50 лет	8	1	Хачатрян В. С.— К вопросу об определении производных от потерь активной мощности по активным мощностям отдельных станций	2	22
Шилин Н. В.— Научно-исследовательский центр по испытанию высоковольтной аппаратуры	9	1	Шкарин Ю. П.— Расчет затухания и входного сопротивления однородной несимметричной линии электропередачи	2	70
Плис Г. С.— Основные этапы стандартизации электротехнического оборудования СССР	10	1	Киракосов В. Г., Лугинский Я. Н. и Портной М. Г.— Автоматическая разгрузка и отключение части гидроагрегатов при увеличении угла электропередачи	3	1
Непорожний П. С.— Электрификация СССР за годы Советской власти	11	1	Бирюкова Р. П., Тимофеев Д. В. и Покровская В. И.— Применение метода статистических испытаний к расчету режимов в электрических системах с тяговыми нагрузками	3	5
Алексенко Г. В.— Важнейшие научно-технические проблемы развития отечественной энергетики	11	7	Гальперин В. Г.— Комплексные схемы замещения для расчета токов при повреждениях в двух точках электрической системы	3	11
Майорец А. И.— Основные этапы развития автоматизированного электропривода в СССР	11	10	Грейсух М. В.— О компенсации реактивной мощности в электроустановках с синхронными двигателями	3	75
Полушкин И. П.— Деятельность энергетической общественности в годы Советской власти	11	19	Урин В. Д.— О критерии для выбора состава работающих агрегатов энергосистемы	3	79
Елютин В. П.— Советская высшая электротехническая школа	12	1	Гершенгорн А. И. и Голембо З. Б.— Исследование несимметрии в электрической системе, содержащей линии сверхвысокого напряжения, с помощью ЭИВМ	4	1
1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА			Авраменко В. Н. и Цукерник Л. В.— Анализ при помощи ЭИВМ электромеханических переходных процессов в сложной энергосистеме с учетом полных уравнений Горева — Парка	4	7
Боголюбов В. Е. и Юркевич В. М.— Приближенный анализ параметрона на варикондах	1	77	Бочев А. С. и Фигурнов Е. П.— Схемы расщепления для релейной защиты	4	13
Фархи С. Л.— Преобразование активного треугольника с одним нелинейным элементом в трехлучевую звезду и обратно	1	82	Фабрикант В. Л. и Орехов Л. А.— Влияние э. д. с., индуцированных в линии связи продольной дифференциальной защиты линий токами нулевой последовательности ЛЭП, на характеристики срабатывания	4	18
Соколов А. А.— Топологический анализ симметричных электрических и электронных цепей	2	47	Сирота И. М.— Схемы индукционного измерения токов в трехфазных цепях высокого напряжения	4	22
Маевский О. А. и Гончаров Ю. П.— Приведенная реактивная мощность электрических цепей с нелинейными элементами	3	22	Розанов М. Н.— Выбор оптимальной степени резервирования при проектировании систем электроснабжения	4	25
Матханов П. Н.— О синтезе реактивных четырехполюсников по заданным переходным характеристикам	3	27	Бургсдорф В. В.— Перенапряжения и уровни изоляции электрических сетей 110—220 кВ	4	34
Котова Л. Ф.— Метод расчета установившегося режима по сдвигу фаз между первыми гармониками на нелинейном элементе	4	88	Жидких Н. М. и Лосев С. Б.— Алгоритм и универсальная программа для комплексного расчета на АЦВМ «Урал-2» всех видов коротких замыканий в сложных сетях	5	7
Данилов Л. В.— Об одном свойстве электрических схем с вентилями	5	81	Огороднейчук И. Ф. и Остроухов В. Д.— Расчет каналов связи по симметричным трехфазным сетям методом теории схем с многополюсными элементами	5	17
Трохименко Я. К.— К реализации RC и RL двухполюсников каноническими схемами	6	84	Веников В. А. и Жуков Л. А.— Регулирование режима электрических систем и дальних электропередач и повышение их устойчивости при помощи управляемых статических ИРМ	6	8
Коган М. Г.— Поверхностный эффект в неравномерно нагретом ферромагнитном цилиндре	8	28			
2. ПРОИЗВОДСТВО И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ					
Александров Г. Н., Лисочкина Т. В. и Окорков В. Р.— Об экономической эффективности применения расширенных проводов на линиях сверхвысокого напряжения	1	12			
Шалыт Г. М.— Учет реактивной проводимости линий при отыскании мест повреждения с помощью фиксирующих приборов	1	17			
Гамм А. З., Крумм Л. А. и Шер И. А.— Оптимизация режима сложной электрической системы градиентным методом с разбивкой на подсистемы	1	21			
Павлов Г. М. и Петрова С. С.— О точности информации при оптимизации режима энергосистем	1	30			

Автор и название статьи

Номер
журн.
Стр.

Автор и название статьи

Номер
журн.
Стр.

- Портной М. Г. и Хачатуров А. А.— Экспериментальное исследование устойчивости в объединенных энергосистемах 6 14
- Заславская Т. Б., Путилова А. Т. и Тагиров М. А.— Функция Ляпунова как критерий синхронной динамической устойчивости 6 19
- Керного В. В.— Расстановка секционирующих устройств в распределительной сети 6 77
- Иофьев Б. И.— Эффективность пусковых органов для устройств и разгрузки электропередачи 7 48
- Кадомская К. П. и Маркавичюс Л. В.— Исследование внутренних перенапряжений в дальних электропередачах на электронных цифровых вычислительных машинах 7 54
- Половой И. Ф.— Воздействующие перенапряжения и испытательные напряжения электрооборудования 110—220 кВ 8 12
- Михайлов В. В.— Критериальное уравнение оптимального пролета ЛЭП 8 17
- Емельянов Н. П.— Потери мощности при короне на линиях электропередачи с нерасщепленными проводами 9 11
- Шаргородский В. Л.— К расчету феррорезонансных явлений в трехфазных сетях с изолированной нейтралью 9 16
- Петканчин Л.— Влияние ошибок измерителей частоты и обменных потоков мощностей при регулировании объединенных энергосистем 9 20
- Кискачи В. М.— Селективность сигнализации замыканий на землю с использованием высших гармоник токов нулевой последовательности 9 24
- Лифшиц Г. Л. и Мезгин В. А.— Некоторые вопросы грозоупорности горных линий электропередачи 9 71
- Горазеева Т. Ф. и Ершевич В. В.— Подсчет годовых потерь энергии в сетях энергосистем на ЭЦВМ 9 74
- Трошин В. А.— О выборе оптимальной структуры и мощности компенсирующих средств 9 76
- Городский Д. А.— Расчет динамических процессов в системе с учетом асинхронной нагрузки 10 7
- Мешель Б. С.— Вероятностно-статистические методы технико-экономических расчетов в промышленных электросетях 10 13
- Конonenko Е. В.— Статическая устойчивость синхронных реактивных машин 10 19
- Шенкман Л. З.— Субгармонические колебания в контуре с существенно нелинейной индуктивностью 10 23
- Веников В. А., Анисимова Н. Д., Мичке Р. и Шелухина Т. И.— Исследование с помощью ЦВМ статической устойчивости сложных автоматически регулируемых электрических систем 11 21
- Жуков Л. А. и Халилов Ч. С.— Пределы мощности электропередач с промежуточными отборами мощности для железнодорожного транспорта, электрифицированного на переменном токе 11 32
- Михневич Г. В. и Фиалков В. М.— Об автоматическом регулировании синхронных компенсаторов 11 43
- Веретенников Л. П. и Яковлев В. П.— Вопросы алгоритмизации переходных процессов в автономных электроэнергетических системах 12 22
- Ступель А. И. и Ильиничин В. В.— Расчет на ЭЦВМ переходных процессов в сложных электрических схемах методом контурных токов 12 28
- Махарадзе О. П.— О способе сравнения синусоидальных электрических величин 12 43
- Константинов Б. А. и Сербиновский Г. В.— Прогнозы потребления электроэнергии за рубежом 12 74
- Солдаткина Л. А.— О международной шкале стандартных напряжений электрических сетей 12 77

По страницам технических журналов

- Проектирование, сооружение и ввод в эксплуатацию линий электропередачи и подстанций 735 кВ в Канаде — Шеренцис А. Н. 3 85
- Системные вопросы на энергетической конференции США 1966 г. — Рокотян В. С. 5 83

3. ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

- Фрейдзон И. Р. и Зубарев Ю. Я.— Проектирование оптимальных судовых систем управления с использованием электронных вычислительных машин 1 33
- Бородин Ю. И. и Иоаннисиан А. Б.— Частотный метод исследования систем с переменными параметрами 1 38
- Любимов Э. В., Динкель А. Д. и Адиятуллин Р. К.— Исследование привода рудничного скипового подъема на АВМ 1 45
- Перельмутер М. М.— Некоторые особенности расчета электропривода крановой тележки 1 52
- Агрест М. М., Насибов А. С. и Чачибая Ц. Ш.— Искажение вершины трансформируемого импульса импульсным трансформатором на коаксиальных кабелях 1 87
- Ослон А. Б.— Аналитический расчет сложных заземлителей 2 30
- Сумин А. Р.— Снижение потенциалов рельсов вблизи тяговых подстанций переменного тока 2 33
- Торопов И. А.— Электромагнитные экраны индукционных печей «высокой» частоты 2 60
- Пивоваров А. А. и Браунштейн М. А.— Система бесконтактного управления главным приводом реверсивного прокатного стана 3 69
- Новоселов Б. В.— Схема торможения электромеханических следящих приводов 4 42
- Неймарк В. Е., Пистрак М. Я., Слежановский О. В. и Фишбейн В. Г.— Синтез быстродействующих систем управления вентильным электроприводом 4 46
- Евсеев П. Н. и Черкасов А. В.— О некоторых способах защиты от поражения током при эксплуатации электродных водонагревательных установок 4 84
- Якобс А. И.— О методах расчета сложных заземляющих систем, расположенных в неоднородных средах 5 24
- Карякин Р. Н.— Демпфирование резонансных колебаний в тяговых сетях двухпутных участков контуром RC 5 34
- Петров Л. П., Ладензон В. А. и Обуховский М. П.— Ограничение переходных моментов при пуске асинхронных двигателей 5 45
- Чистов В. П., Матафонов П. П. и Троян В. А.— Оптимальное по быстродействию управление электроприводами постоянного тока 5 48
- Бургин Б. Ш.— Коррекция нелинейных САР тиристорных электроприводов драги при низкочастотном возмущении 5 53
- Токарева В. Д.— Переходные процессы в электроприводе постоянного тока с быстродействующими электромагнитными муфтами 5 58
- Могилевский В. Г., Суд И. И. и Школьников Б. М.— О выборе типа электромагнитных муфт для электроприводов буровых механизмов 5 63
- Рипс Я. А. и Моцохейн Б. И.— О законах распределения вероятностей наработки между отказами и времени восстановления бурового электрооборудования 6 69
- Жердев И. Т., Поляков И. И., Ивонин А. И., Москвцов Д. П. и Яськов Е. С.— Ток шихты ферросилициевых печей мощностью 16,5 Мва 6 80
- Рудаков В. Н., Муравьева Г. Я., Гефтер С. Э., Белянин А. Н. и Копейкина И. А.— Трехмерная модель для исследования электрического поля алюминиевого электролизера 7 30
- Ефремов И. С., Яковлев А. И. и Гушо-Малков Б. П.— Электрический привод с автономным питанием на колесном безрельсовом транспорте 7 73
- Бай Р. Д., Бреслав И. З., Фельдман А. В. и Хрушев А. П.— Повышение надежности системы управления электроприводом 7 79

Автор и название статьи	Номер журн.	Стр.
Якобс А. И., Коструба С. И. и Живаго В. Т.— Расчет сложных заземляющих устройств с помощью ЭЦВМ	8	21
Щитова В. М., Слепушкин Е. И. и Длугач Д. Я.— Анализ систем автоматического регулирования процесса электрохимической обработки материалов	8	71
Иоссель Ю. Я. и Павловский Р. А.— К расчету сопротивлений растеканию линейно поляризующихся электродов	9	30
Есипов В. М. и Цукерман И. И.— Способ определения характеристик устойчивости многоконтурных систем автоматического управления с помощью ЭЦВМ	10	49
Бродовский В. Н. и Иванов Е. С.— Бесконтактный электропривод с частотно-токовым управлением для замкнутых систем регулирования	10	53
Кириченко А. Г. и Яковлев Б. С.— Учет влияния и выбор динамических свойств источников питания систем автоматического управления	10	75
Шпилло В. П.— Вентильный преобразователь как элемент системы автоматического регулирования	11	63
Кожевников К. И.— Экстремальное управление главным приводом обжимного прокатного стана	11	70
Бабушкин С. А., Ильин Г. З. и Никитина Л. В.— Об определении произвольных постоянных при расчете переходных процессов в линейных системах автоматического управления	11	91
Пустыльников В. М. и Ахмадиев А. Т.— Исследование работы электропривода управляемого прямооточного волоочильного стана в режиме разгона	12	47
Гендельман Б. Р.— Исследование работы бесконтактной системы управления главным приводом блюминга 1300	12	52
Петров Л. П. и Ладензон В. А.— Формирование пусковых процессов асинхронных двигателей включением сопротивлений в цепь статора	12	58
Чукбар В. А.— Использование симметричного питания однофазным током для регулирования скорости трехфазных асинхронных двигателей	12	63
Ионкин П. А. и Ващенко В. П.— О применении направленных графов и структурных схем для анализа электрических цепей и систем автоматического управления	12	66
Вайднер Г. И.— Применение электронных цифровых вычислительных машин для всестороннего анализа электрической нагрузки больших промышленных предприятий	12	70

4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ТРАНСФОРМАТОРЫ

Эйбшиц А. Г.— Исследование весо-габаритных характеристик синхронных машин	1	1
Станиславский Л. Я., Гаврилов Л. Г., Лембриков В. М. и Рабинович В. М.— Проблемы виброустойчивости конструкций статоров мощных турбогенераторов	1	6
Либкинд М. С. и Дорожки Л. И.— Электромагнитные характеристики управляемого реактора с поперечным подмагничиванием	1	56
Пашинский В. Г.— Многофазный шунтовой коллекторный электродвигатель и его эквивалентная схема замещения	1	61
Варлей В. В.— О рациональном числе пар полюсов синхронной электрической машины с катящимся ротором	1	65
Новиков А. В. и Теслюк Н. Г.— Колебания напряжения асинхронного генератора	1	85
Вольдек А. И.— Зависимость технико-экономических показателей индукционных магнетогидродинамических машин от магнитного числа Рейнольдса	2	1
Васильев Ю. К.— Тепловой расчет однорядных обмоток возбуждения при переменном сечении проводников	2	37

Автор и название статьи	Номер журн.	Стр.
Трещев И. И.— О некоторых особенностях синхронной машины со сверхпроводящей обмоткой возбуждения	2	42
Швецов А. Г.— Отображение электромагнитной энергии магнета на диаграмме магнита	2	54
Усов С. В., Черновец А. К. и Козулин В. С.— Быстродействие управляемого реактора с вращающимся магнитным полем	3	81
Лоханин А. К.— Расчет перенапряжений в катушечных обмотках трансформаторов	4	29
Гурин В. В. и др.— Испытание автотрансформатора 750 кВ на частичные разряды	4	90
Крайз А. Г.— Определение оптимальной области применения двухрамных сердечников трансформаторов	5	67
Белова Л. А., Мамиконянц Л. Г. и Тутубалин В. Н.— О статистической однородности корпусной изоляции статоров турбогенераторов	6	40
Жадин К. П. и Приклонский Е. Н.— Технико-экономическая эффективность использования синхронных электродвигателей для компенсации реактивной мощности	6	47
Мелёшин В. И.— Механическая характеристика конденсаторного двигателя с полым ротором	6	57
Сидельников Б. В. и Эйбшиц А. Г.— Некоторые результаты анализа переходных процессов высокоиспользованного синхронного генератора	7	13
Городский Д. А.— Расчет переходных процессов в синхронных машинах с учетом демпферных обмоток	7	17
Голубков Н. Е., Морщаков Н. А. и Гольдгейль Д. М.— Расчет потерь на вихревые токи в печатных обмотках машин постоянного тока методом узлового напряжения	7	24
Карасев В. В. и Лейтес Л. В.— Электромагнитные характеристики конструкционной стали на переменном токе и их применение в трансформаторостроении	8	32
Ермилов М. А. и Хан В. Х.— Об одном способе расчета магнитных полей в электрических машинах	8	41
Бахвалов Ю. А., Гринченков В. П., Никитенко А. Г. и Образцов В. А.— Расчет процесса гашения поля электрических машин на аналоговых электронных вычислительных машинах	8	50
Чиликин М. Г., Аракелян А. К. и Афанасьев А. А.— Коммутация синхронной машины, питаемой через зависимый мостовой преобразователь частоты	8	61
Хенкин А. Л.— Особенности измерения удельных потерь термометрическим методом в ферромагнитных пластинах	9	45
Бальян Р. Х.— О весовых и габаритных показателях сухих трансформаторов	10	28
Стома С. А.— К теории гистерезисных машин	10	32
Морозов Г. Г.— Проектирование гистерезисных синхронных двигателей с минимальной потребляемой мощностью	10	36
Балагуров В. А.— Трансформаторы для систем зажигания	10	39
Глебов И. А., Бобров В. М., Попов Е. Н., Лапаев К. В. и Пташкин А. В.— Исследование полупроводниковой системы возбуждения мощного турбогенератора	11	36
Ипатов П. М., Дукштау А. А. и Детинко Ф. М.— Вибрации гидрогенераторов	11	48
Дулькин А. И. и Иванов-Смоленский А. В.— Магнитное поле в воздушном зазоре синхронной явнополюсной машины	11	53
Морозов Д. Н.— Расчет местных и общих потерь в пластинах, пронизываемых потоком рассеяния трансформатора или реактора	12	32
Дмитриев К. С., Казанский В. Е., Королев Е. П. и Либерзон Э. М.— Метод расчета токовой и угловой погрешности трансформатора тока при глубоком насыщении сердечника	12	39

Автор и название статьи		Номер журн.	Стр.	Автор и название статьи		Номер журн.	Стр.
5. АППАРАТЫ, ПРИБОРЫ, ИЗМЕРЕНИЯ				Борчанинов Г. С.— Математическое моделирование электрических характеристик токопроводов		6	24
Сирота С. М. и Ступель А. И.— Контрольные испытания вентилях большой мощности с ртутным катодом	1	69		Савельев В. П. и Иванова Т. К.— Исследование пробивных напряжений вентилях разрядников при коммутационных перенапряжениях	6	26	
Уваров А. И.— Защита полупроводниковых вентилях от повреждений при флуктуациях обратного тока	1	72		Ураев В. П.— О расчете статической вольт-амперной характеристики электрической дуги	6	32	
Каплан Д. А., Конторович А. М., Кучинский Г. С., Грейсух М. А. и Мессерман Г. Т.— Электрические характеристики аппаратной бумажно-масляной изоляции при коммутационных перенапряжениях	2	25		Пушкин В. Я.— Работа ионного инвертора с параллельной схемой анодной цепи на активно-индуктивную нагрузку	6	60	
Кацнельсон С. М.— Критерий устойчивости самовозбуждающихся инверторов	2	65		Карпов Е. А. Определение области регулирования управляемого моста	6	65	
Бальян Р. Х.— Исследование теплового режима тороидальных электромагнитных элементов	2	76		Демирчян К. С.— Моделирование вихревого магнитного поля в неоднородной среде	6	74	
Бобров И. И.— Импульсный автоматический синхронизатор	3	14		Андреев С. Н. и Гусев Г. Г.— Об одной аппроксимации характеристик дросселя с подмагничиванием	6	83	
Волкова О. В. и Чернышов В. И.— Электрические характеристики защитных промежутков 500 кВ	3	19		Вишневский Ю. И., Каплан В. В., Нашатырь В. М. и Янчус Э. И.— Опыт исследования коммутационной способности воздушного выключателя на 750 кВ	7	7	
Основич Л. Д.— Метод расчета магнитных проводимостей воздушных зазоров	3	31		Кривошеин М. И.— К вопросу аппроксимации зависимостей магнитной проницаемости и потерь в ферритовых сердечниках от поля	7	27	
Розенблат М. А.— Обобщенные коэффициенты прямоугольности петли гистерезиса ферромагнетиков и сердечников	3	35		Пашенцев И. Д., Завьялов В. А., Грицевский Е. А. и Степанов Н. В.— Тепловые и перегрузочные характеристики силовых кремниевых лавинных вентилях в режиме импульсных перенапряжений	7	34	
Гостев В. И.— К анализу одной схемы компенсации «квадратурной» составляющей напряжения	3	40		Фабрикант В. Л.— О построении надежных схем из ненадежных реле	7	42	
Кривошеин М. И.— Феррорезонансный датчик-преобразователь с двумя нелинейными индуктивностями	3	43		Калатошивили Н. И. и Капанадзе Г. У.— Некоторые схемы параллельного преобразования двоичного кода Грея в прямой двоичный код	7	86	
Стефанович Т. Х.— Исследование левой ветви характеристики вход—выход магнитного усилителя с самонасыщением	3	48		Сисуненко О. И., Береза В. Л. и Коваль В. В.— Использование электростатического поля для интенсификации охлаждения обмоток маслонаполненных электрических аппаратов	8	38	
Сандлер А. С. и Гусяцкий Ю. М.— Автономный инвертор с широтно-импульсной модуляцией по синусоидальному закону для частотного управления асинхронными двигателями	3	53		Сипайлов Г. А., Ивашин В. В., Лоос А. В. и Хорьков К. А.— Получение больших электромагнитных энергий при совместной работе ударного генератора и конденсаторной батареи	8	46	
Полтев А. И., Петин О. В. и Маркуш Г. Д.— Электромагнитное гашение дуги в элегазе	3	59		Бертинов А. И., Мизурин С. Р., Сериков В. А. и Геворкян Р. Л.— Энергетика процесса заряда конденсатора от генератора переменного тока через выпрямитель	8	54	
Новиков Л. З. и Орлов О. Ф.— К теории электростатического подвеса шара	3	63		Гимоян Г. Г.— Работа выпрямителей на согласную э. д. с. и различные виды нагрузки	8	66	
Евсеев Ю. А. и Челноков В. Е.— Обращенный тиристор и симметричный тиристор с двуполярным управлением	4	54		Астафьевская Т. С.— К расчету магнитных систем с постоянными магнитами	8	79	
Давидов П. Д.— Расчет тепловых режимов тиристорных, используемых в схемах промышленной электроники	4	58		Борин В. Н.— Исследование поверхностного разряда в элегазе с помощью зондов	9	34	
Смородинов В. В.— Тиристорный преобразователь частоты для электротермии	4	66		Фикс И. Г.— Магнитное поле обмоток сложной конфигурации с цилиндрическим магнитопроводом (экраном)	9	40	
Быков Ю. М. и Книгин В. М.— Исследование процесса запуска тиристорных возбудителей	4	69		Меерович Э. А. и Андреевская Л. И.— Измерение больших постоянных токов с использованием датчиков Холла	9	49	
Фрумкин А. А.— Автогенераторы с общим анодом в высокочастотных установках для нагрева диэлектриков	4	72		Глазенько Т. А.— Применение метода фазовой плоскости для расчета электромагнитных процессов в инверторах с двухступенчатой емкостной коммутацией	9	53	
Бондаревский Л. В. и Пеклер В. Н.— К вопросу об оптимальном использовании аварийных осциллографов в энергосистемах	4	80		Быков Ю. М.— Исследование электромагнитных процессов в тиристорных преобразователях с защитными RC-цепями	9	62	
Горбульский Я. Х.— Оптимальные размеры обмоточного пространства электромагнитов постоянного тока с якорем из материала с малой магнитной проницаемостью	4	86		Окунев Ю. Т., Пасынков В. В. и Воскресенский А. А.— Мощные нелинейные шунты для защиты полупроводниковых диодов	9	66	
Ираний П. Б. и Петухова Г. П.— О возможности кратковременной перегрузки выключателей серии ВМП-10	5	13		Ефремов И. С., Загайнов Н. А., Никольский И. К., Слепцов М. А. и Чирвинский В. М.— Основные характеристики лавинных кремниевых вентилях	9	69	
Маевский О. А.— Определение энергетических соотношений в групповых вентилях преобразователях с реальными трансформаторами	5	27		Тагер П. Г., Анисимов С. А. и Жижневская И. Г.— Перемагничивание ленты при возрастании тока в магнитной головке	9	79	
Пульвер Ю. М. и В. Б. Давыдюк — Анализ точности дистанционных передач на многополюсных синусно-косинусных поворотных трансформаторах	5	39		Кожеников С. Н., Лобода В. М. и Фабрика Л. П.— Выбор оптимальных параметров электромагнитных устройств с помощью электронной модели	10	44	
Сипайлов Г. А., Ивашин В. В. и Лоос А. В.— Генератор больших импульсных мощностей со ступенчатой или трапецеидальной формой тока	5	71					
Боголюбов В. Е., Вершин В. Е. и Добролюбов Л. В.— Анализ переходных процессов в цепи с туннельным диодом	5	79					

Автор и название статьи

Номер
журн.

Стр.

- Здрок А. Г.— Анализ работы управляемых диодов в однофазных схемах выпрямления 10 61
- Мосткова Г. П., Ковалев Ф. И. и Чванов В. А.— Условия пуска автономных инверторов 10 66
- Мизюк Л. Я. и Ничога В. А.— Аналитические соотношения для расчета коэффициентов размагничивания стержневых сердечников 10 73
- Хвостов В. С. и Гаврилов Я. И.— Исследование схемы мощного импульсного преобразователя с параллельной емкостной коммутацией 10 76
- Фигурнов Е. П.— Теория полупроводниковых импульсных реле времени 11 27
- Федченко И. К. и Ильенко О. С.— Теория длинной открытой дуги переменного тока и постоянная времени дуги 11 58
- Шереметьевский Н. Н. и Шустер О. И.— Анализ и синтез транзисторных инверторов, выполненных по схемам кольцевых коммутаторов 11 78
- Гельман М. В.— Уменьшение скорости нарастания и амплитуды «всплесков» прямого напряжения на вентиле 11 83
- Ситник Н. Х. и Русских А. А.— Процесс выключения тиристора 11 86
- Залеский А. М., Зибер К. и Полтев А. И.— Некоторые исследования разрядных напряжений в сжатых газах 12 6
- Борин В. Н.— Некоторые закономерности поверхностного разряда в элегазе (SF_6) 12 10
- Волкова О. В.— Электрические характеристики координирующего промежутка на напряжение 750 кВ 12 72

6. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, КАБЕЛИ, ДЕТАЛИ

- Зайдель Р. М.— Диэлектрические свойства среды с плоскими частицами примеси 1 89
- Попова В. П.— Исследование частотных характеристик электротехнической стали 5 75
- Дроздов Н. Г., Аладьев А. Т. и Есиков Ю. Г.— Перспективы применения пластмасс в изоляторостроении 6 37
- Варшавский Д. С. и [Калантар Н. Г.] — Влияние частоты переменного тока на поведение бумажно-масляной изоляции при ускоренных испытаниях 7 70
- Пачалджян Х. Б.— Метод увеличения пьезомодуля поливинилхлорида 10 78
- Воробьев Г. А. и Воробьев А. А.— Электрический пробой твердых диэлектриков 12 14

7. РАЗНЫЕ СТАТЬИ И ИНФОРМАЦИИ

- Глухов В. П.— Применение теории подобия и физического моделирования для анализа и расчета электрических цепей со сталью 2 49
- Веревкин В. Н., Горшков В. И. и Фетисов П. А.— Искровые разряды по поверхности диэлектрических пневмотранспортных труб 4 77
- Ильинский Н. Ф. и Цаценкин В. К.— Топологические методы в электромеханике 6 51
- Музей Московского энергетического института 6 85
- Захар-Иткин М. Х.— Применение теории графов к распределению частот высокочастотной и радиосвязи в энергосистемах 7 38
- Колечников Е. С.— Исследование коронного разряда на частотах выше 10 кГц 7 59
- Базелян Э. М.— Зоны защиты одиночных стержневых молниеотводов 7 64
- Кузнецов П. И. и Малыгин Л. И.— Переходные процессы в спинном генераторе 7 82
- Веников В. А., Астахов Ю. Н., Зуев Э. Н. и Карасев Д. Д.— Метод относительных единиц при решении некоторых технико-экономических задач энергетики 8 7
- Межвузовская конференция по применению физического и математического моделирования 8 92

Автор и название статьи

Номер
журн.

Стр.

8. ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

- Изьюров В. А. и Майков С. Я.— Первый советский электропоезд на линии Баку — Сабунчи — Сураханы 5 82
- Веселовский О. Н.— Майкл Фарадей 9 81
- Белькинд Л. Д. и Каменева В. А.— Павел Петрович Копняев 9 83
- Бузинова-Дыбовская В. М.— План ГОЭЛРО для Туркестанского района 9 83
- Полизо Г. Д.— Первая в России центральная электростанция переменного тока 12 79

9. ДИСКУССИИ

- Перспективная схема напряжения для электроснабжения сельских районов — Усманов Ф. Х. 1 90
- Анализ при помощи ЭЦВМ электромеханических переходных процессов в сложной энергосистеме с учетом полных уравнений Горева — Парка — Чесаченко В. Ф. 4 91
- Ответ авторов — Цукерник Л. В., Авраменко В. Н. 4 92
- К вопросу о целесообразности релейной защиты от коротких замыканий — Баркан Я. Д., Черновец А. К., Рогов Л. Д. 5 86
- Технико-экономические обоснования выбора вида энергии на бытовые нужды в городах СССР — Червоненкис Я. М., Михайлова В. М. 6 86
- К внедрению напряжения 20 кВ — Файбисович Д. Л. 6 88
- Зависимость надежности релейной защиты от условий и надежности защищаемого элемента — Рипс Я. А., Барзам А. Б., Гук Ю. Б., Манов Н. А. 8 81
- Об особенностях техники надежности релейной защиты. (Ответ автора) — Смирнов Э. П. 8 89
- К вопросу о целесообразности значений токов короткого замыкания в распределительных сетях — Грейсух М. В. 10 80
- К вопросу о целесообразности значений токов короткого замыкания в распределительных сетях — Балашов К. К., Плотницкий А. Э. 12 81

10. ХРОНИКА

Информации

- Научно-техническое совещание по применению силовых проводниковых вентилях и тиристорных на железнодорожном транспорте 1 91
- Диссертации 1 93
- VIII Всесоюзная конференция по автоматическому контролю и методам электрических измерений 2 81
- Научно-техническое совещание по трансформаторостроению 2 82
- Диссертации 2 85
- Научно-техническая конференция по силовым полупроводниковым приборам и преобразователям 4 94
- Научно-техническое совещание по вопросам разработки, проектирования и эксплуатации устройств компенсации емкостных токов замыкания на землю в электрических сетях 5 91
- 3-я Ленинградская научно-техническая конференция по повышению качества, надежности и долговечности промышленных изделий 5 92
- Диссертации 6 91
- Стандарт на шаговые электродвигатели общепромышленного применения 7 88
- Секция кибернетики и математического моделирования при Отделении физико-технических проблем энергетики АН СССР 7 89
- Совещание «Основные направления проектирования и развития городских электрических сетей» 9 87
- Семинар «Автоматизированные электроприводы и промышленные установки с управляющими и вычислительными устройствами» 9 89
- Научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития полупроводникового возбуждения синхронных двигателей» 9 89

Автор и название статьи	Номер журн.	Стр.
III Всесоюзная межвузовская конференция по заземлениям	10	82
Решение комиссии ЦЕНТОЭП по установлению критериев безопасности электрического тока	10	85
III Всесоюзная конференция по бесконтактным электрическим машинам	11	92
Юбилей		
Профессор Д. Г. Жимерин	2	83
Э. А. Меерович	2	83
Профессор Д. К. Минов	2	84
Профессор А. А. Федоров	3	92
Профессор Н. П. Ермолин	3	92
Профессор Б. А. Князевский	5	93
Александр Емельянович Алексеев	6	89
Отто Вильгельмович Бенедикт	6	89
Доктор технических наук, профессор И. И. Петров	9	86
Профессор П. А. Ионкин	10	86
Профессор Виктор Михайлович Синьков	12	82

Некрологи

Профессор Н. П. Куницкий	3	93
Алексей Васильевич Панов	5	94
Борис Аркадьевич Телешев	6	90
Станислав Николаевич Вешеневский	6	91
Николай Петрович Богородицкий	10	87
Профессор И. Р. Бельский	10	88
Профессор А. К. Дарманчев	12	82

11. ЗАМЕТКИ И ПИСЬМА

К сведению наших читателей	3	78
К читателям журнала «Электричество»	3	84
Музей Московского энергетического института	6	85
Подписывайтесь на ежемесячный сборник «Энергетическое строительство»	9	85
К читателям журнала «Электричество»	9	90

12. БИБЛИОГРАФИЯ

Книга Н. П. Богородицкого, Ю. М. Волокобинского, А. А. Воробьева и Б. М. Тареева «Теория диэлектриков» — Дроздов Н. Г., Федченко И. К. и Иерусалимов М. Е.	2	89
Ответ автора книги на рецензии, опубликованные в № 1 и 2 журнала «Электричество» за 1966 г. — Брон О. Б.	2	90
От редакции	2	92
Новые книги издательства «Энергия»	2	92
Книга А. Д. Дроздова «Электрические цепи с ферромагнитными сердечниками в релейной защите» — Воскресенский А. А.	3	94

Автор и название статьи	Номер журн.	Стр.
Новые книги издательства «Энергия»	4	17
Новые книги издательства «Энергия»	5	44
Книга В. Т. Ренне, Ю. В. Багалея и И. Д. Фридберга «Расчет и конструирование конденсаторов» — Бронгулеева М. Н., Завалишин И. И., Яманова Л. В. и Ливенцева Н. Д.	5	95
Новые книги издательства «Энергия»	6	73
Книга М. В. Рогали-Левицкого, В. Н. Степанова и А. А. Тайца «Электрические станции и трансформаторные подстанции» — Князевский Б. А.	6	93
Статистический анализ геометрии гидрогенераторов. (Ответ Г. Н. Тер-Газаряну, Г. К. Жерве и В. В. Домбровскому) — Тардов Б. Н.	6	94
От редакции	6	95
Новые книги издательства «Энергия»	7	85
	и 87	
Книга М. Н. Бронгулеевой и С. С. Городецкого «Кабельные линии высокого напряжения» — Малкин Х. Р.	7	90
Книга В. А. Веникова «Теория подобия и моделирование применительно к задачам электроэнергетики» — Квальвассер В. И., Комаров А. И. и Степанян А. А.	9	91
Книга В. П. Бычкова «Электропривод и автоматизация металлургического производства» — Крупович В. И., Дружинин Н. Н., Тищенко Н. А., Петров И. И. и Шейнман А. И.	9	92
Новые книги издательства «Энергия»	9	93
Новые книги издательства «Энергия»	11	93
Книга Н. А. Казака, Б. А. Князевского, С. С. Лазарева и Д. С. Лившица «Электроснабжение промышленных предприятий» — Волобровский С. Д.	12	83

13. ОБЪЯВЛЕНИЯ ИНОСТРАННЫХ ФИРМ

Силиконы в промышленности	1	96
Стеклянные трубки для ламповой и электронной промышленности	1	Обл.
Польское общество внешней торговли по электротехнике «Электрим»	1	Обл.
Стеклянные трубки для ламповой и электронной промышленности	2	Обл.
Силиконы в промышленности	2	Обл.
Стеклянные трубки для ламповой и электронной промышленности	3	Обл.
2 миллиона ламп Жан Рошэ	4,5	Обл.
Пользуйтесь медными концевыми и соединительными гильзами «Фудзи Киндзоку»	6	Обл.
Электротехника, электроника, автоматика ГДР	6	Обл.
2 миллиона ламп Жан Рошэ	7	Обл.



II. АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Абелишвили Л. Г. 2, 84
Авраменко В. Н. 4, 7; 4, 94
Агрест М. М. 1, 87
Адиатуллин Р. К. 1, 45
Аладьев А. Т. 6, 37
Александров Г. Н. 1, 12
Александров Б. К. 2, 84
Алексеев А. Е. 2, 84; 3, 93
Алексенко Г. В. 5, 94; 11, 7
Алябьев М. И. 3, 93; 6, 89
Андреев С. Н. 6, 83
Андреевская Л. И. 9, 49
Анисимов С. А. 9, 79
Анисимова Н. Д. 11, 21
Антонов А. К. 7, 1
Аракелян А. К. 8, 61
Астахов Ю. Н. 8, 7
Асташевская Т. С. 8, 79
Афанасьев А. А. 8, 61
Ахмадиев А. Т. 12, 47

Б

Бабушкин С. А. 11, 91
Базелян Э. М. 7, 64
Бай Р. Д. 7, 79
Балагуров В. А. 10, 39
Балашов К. К. 12, 81
Бальян Р. Х. 2, 76; 10, 28
Барзам А. Б. 8, 83
Баркан Я. Д. 5, 86
Бахвалов Ю. А. 8, 50
Бахарин А. В. 3, 93; 6, 89;
9, 89
Белькинд Л. Д. 9, 83
Белова Л. А. 6, 40
Беляков В. А. 2, 84
Белянин А. Н. 7, 30
Бергер А. Я. 6, 89
Береза В. Л. 8, 38
Бертинов А. И. 5, 94; 8, 54
Бирюкова Р. П. 3, 5
Бобров И. И. 3, 14
Бобров В. М. 11, 36
Боголюбов В. Е. 1, 77; 5,
79
Богородицкий Н. П. 3, 93;
6, 89
Бойчев Б. Х. 2, 9
Бондаревский Л. В. 4, 80
Борин В. Н. 9, 34; 12, 10
Бородин Ю. И. 1, 38
Борчанинов Г. С. 6, 24
Бочев А. С. 4, 13
Браунштейн М. А. 3, 69
Бреслав И. 3, 7, 79
Бродовский В. Н. 10, 53
Брон О. Б. 2, 92
Бронгулеева М. Н. 5, 95
Бузинова-Дыбовская В. М.
9, 85
Булгаков К. В. 6, 89
Бургсдорф В. В. 4, 34
Бургин Б. Ш. 5, 53
Быков Ю. М. 4, 69; 9, 62

В

Вайнер А. Л. 10, 85
Вайднер Г. И. 12, 70
Варлей В. В. 1, 65
Варшавский Д. С. 7, 70
Васильев Ю. К. 2, 37; 7, 89
Васильев Д. В. 3, 93; 6, 89
Вашенко В. П. 12, 66
Веников В. А. 2, 13; 5, 94;
6, 8; 6, 89; 8, 7; 11, 21
Веревкин В. Н. 4, 77

Вершин В. Е. 5, 79
Веретенников Л. П. 12, 22
Веселовский О. Н. 9, 83
Вишневы Ю. И. 7, 7
Вольдек А. И. 2, 1
Волкова О. В. 3, 19; 12, 72
Волобрынский С. Д. 12, 85
Воронков Н. Н. 9, 90
Воробьев Г. А. 12, 14
Воробьев А. А. 12, 14
Воскресенский А. А. 3, 95;
9, 66

Г

Гаврилов Л. Г. 1, 6
Гаврилов Я. И. 10, 76
Гальперин В. Г. 3, 11
Гамм А. З. 1, 21
Геворкян Р. Л. 8, 54
Гельман М. В. 11, 83
Гендельман Б. Р. 12, 52
Герасимов В. Н. 2, 84
Гершенгорн А. И. 4, 1
Гефтер С. Э. 7, 30
Гимоян Г. Г. 8, 66
Глазенов Т. А. 9, 53; 9, 89
Глебов И. А. 11, 36
Глухов В. П. 2, 49
Гольдгейль Д. М. 7, 24
Голембо З. Б. 4, 1
Голубков Н. Е. 7, 24
Гончаров Ю. П. 3, 22
Горазеева Т. Ф. 9, 74
Горбульский Я. Х. 4, 86
Городский Д. А. 7, 17; 10,
7
Горшков В. И. 4, 77
Гостев В. И. 3, 40
Грейсх М. А. 2, 25
Грейсх М. В. 3, 75; 10, 80
Гринченков В. П. 8, 50
Григевский Е. А. 7, 34
Гук Ю. Б. 5, 93; 8, 87
Гурин В. В. 4, 90
Гусев Г. Г. 6, 83
Гусацкий Ю. М. 3, 53
Гущо-Малков Б. П. 7, 73

Д

Давидов П. Д. 4, 58
Давыдюк В. Б. 5, 39
Данилов Л. В. 5, 81
Демирчян К. С. 6, 74
Детинко Ф. М. 11, 48
Дикин Ю. И. 11, 93
Дипкель А. Д. 1, 45
Длугач Д. Я. 8, 71
Дмитриев К. С. 12, 39
Добролюбов Л. В. 5, 79
Дорожко Л. И. 1, 56
Дроздов Н. Г. 2, 90; 6, 37
Дружинин Н. Н. 9, 92
Дукштау А. А. 11, 48
Дулькин А. И. 11, 53

Е

Евсеев Ю. А. 4, 54
Евсеев П. Н. 4, 84
Елютин В. П. 12, 1
Емельянов Н. П. 9, 11
Ермилов М. А. 8, 41
Ермолин Н. П. 6, 89
Ершевич В. В. 9, 74
Есиков Ю. Г. 6, 37
Есипов В. М. 10, 49
Ефремов И. С. 2, 84; 7, 73;
9, 69

Ж

Жадин К. П. 6, 47
Жердев И. Т. 6, 80
Жерехин И. П. 6, 89
Живаго В. Т. 8, 21
Жидких Н. М. 5, 7
Жижевская И. Г. 9, 79
Жимерин Д. Г. 2, 84; 5, 1;
5, 94
Жуков Л. А. 6, 8; 11, 32

З

Завалишин И. И. 5, 95
Завьялов В. А. 7, 34
Загайнов Н. А. 9, 69
Зайдель Р. М. 1, 89
Зайцева Э. Т. 7, 89
Залесский А. М. 12, 6
Заславская Т. Б. 6, 19
Захарин А. Г. 2, 84
Захар-Иткин М. Х. 7, 38
Здрок А. Г. 10, 61
Зибер К. 12, 6
Зубарев Ю. Я. 1, 33
Зув Э. Н. 7, 89; 8, 7

И

Иванова Т. К. 6, 26
Иванов Е. С. 10, 53
Иванов-Смоленский А. В.
6, 89; 11, 53
Ивашин В. В. 5, 71; 8, 46
Ивонин А. И. 6, 80
Иерусалимов М. Е. 2, 90
Изьуров В. А. 5, 82
Ильенко О. С. 11, 58
Ильинский Н. Ф. 6, 51
Ильин Г. З. 11, 91
Ильиничин В. В. 12, 29
Иоаннисан А. Б. 1, 38
Ионкин П. А. 2, 84; 12, 66
Иосель Ю. Я. 9, 30
Иофьев Б. И. 7, 48
Ипатов П. М. 3, 93; 11, 48
Ираний П. Б. 5, 13
Исаев И. П. 2, 84

К

Кадомская К. П. 7, 54
Казанский В. Е. 12, 39
Калатозишвили Н. И. 7, 86
Калантар Н. Г. 7, 70
Калиниченко И. С. 4, 90
Каменева В. А. 9, 83
Каменский М. Д. 2, 84
Капанадзе Г. У. 7, 86
Каплан Д. А. 2, 25; 4, 90
Каплан В. В. 7, 7
Караулов Н. А. 2, 84
Карасев Д. Д. 8, 7
Карасев В. В. 8, 32
Карпов Е. А. 6, 65
Карякин Р. Н. 5, 34
Кацнельсон С. М. 2, 65
Каялов Г. М. 2, 5
Квальвассер В. И. 9, 91
Керного В. В. 6, 77
Киракосов В. Г. 3, 1
Кириченко А. Г. 10, 75
Кискачи В. М. 9, 24
Книгин В. М. 4, 69
Князевский Б. А. 6, 94
Ковалев Ф. И. 10, 66
Коваль В. В. 8, 38
Ковчин С. А. 9, 89
Коган М. Г. 8, 28

Кожевников С. Н. 10, 44
Кожевников К. И. 11, 70
Козулин В. С. 3, 81
Козырев Б. П. 3, 93
Колечицкий Е. С. 7, 59
Комаров Д. Т. 8, 1
Комаров А. И. 9, 91
Конonenko Е. В. 10, 19
Константинов Б. А. 12, 74
Конторович А. М. 2, 25; 4,
90

Копейкина И. А. 7, 30
Королев Е. П. 12, 39
Костенко М. П. 2, 84
Коструба С. И. 8, 21
Котова Л. Ф. 4, 88
Крайз А. Г. 5, 67; 5, 94
Кривошеин М. И. 3, 43; 7,
27

Крумм Л. А. 1, 21
Крупович В. И. 9, 92
Кузнецов П. И. 7, 82
Куренный Э. Г. 2, 5
Кучинский Г. С. 2, 25

Л

Ладензон В. А. 5, 45; 12, 58
Лапаев К. В. 11, 36
Лапшин В. К. 11, 93
Левит А. Г. 4, 90
Лейтес Л. В. 8, 32
Лембриков В. М. 1, 6
Либерзон Э. М. 12, 39
Либкинд М. С. 1, 56; 2, 84
Ливенцова Н. Д. 5, 95
Лисочкина Т. В. 1, 12
Лифшиц Г. Л. 9, 71
Лобода В. М. 10, 44
Лоос А. В. 5, 71; 8, 46
Лосев С. Б. 5, 7
Лоханин А. К. 4, 29
Лугинский Я. Н. 3, 1
Любимов Э. В. 1, 45

М

Маевский О. А. 3, 22; 5,
27
Майков С. Я. 5, 82
Майорец А. И. 11, 10
Малкин Х. Р. 7, 91
Малыхин Л. И. 7, 82
Мамиконянц Л. Г. 6, 40
Манов Н. А. 5, 93; 8, 87
Маркович И. М. 2, 84
Маркуш Г. Д. 3, 59
Марквичус Л. В. 7, 54
Матафонов П. П. 5, 48
Матханов П. Н. 3, 27
Махарадзе О. П. 12, 43
Медведев С. Д. 5, 94
Мезгин В. А. 9, 71
Меерович Э. А. 9, 49
Мелентьев Л. А. 6, 1
Мелешин В. И. 6, 57
Мельников Н. А. 3, 92
Мессерман Г. Т. 2, 25
Мешель Б. С. 10, 13
Мизюрин С. Р. 8, 54
Мизюк Л. Я. 10, 73
Михайлова В. М. 6, 86
Михайлов В. В. 8, 17
Михневич Г. В. 11, 43
Мичке Р. 11, 21
Могилевский В. Г. 5, 63
Молоканов С. И. 5, 94
Морозов Г. Г. 10, 36
Морозов Д. Н. 12, 32

Моршаков Н. А. 7, 24
Московцев Д. П. 6, 80
Мосткова Г. П. 10, 66
Моцохейн Б. И. 6, 69
Мукозеев Ю. Л. 3, 92
Муравьева Г. Я. 7, 30

Н

Насибов А. С. 1, 87
Нашатырь В. М. 7, 7
Наяншов И. С. 5, 94
Неймарк В. Е. 4, 46
Непорожний П. С. 11, 1
Никитин Д. В. 2, 13
Никитина Л. В. 11, 91
Никитеко А. Г. 8, 50
Николаева М. И. 2, 82
Никольский И. К. 9, 69
Ничога В. А. 10, 73
Новиков А. В. 1, 85
Новиков Л. З. 3, 63
Новоселов Б. В. 4, 42
Норневский Б. И. 3, 93; 6, 89

О

Образцов В. А. 8, 50
Обуховский М. П. 5, 45
Огороднейчук И. Ф. 5, 17
Окороков В. Р. 1, 12
Окунев Ю. Т. 9, 66
Орехов Л. А. 4, 18
Орлов О. Ф. 3, 63
Ослон А. Б. 2, 30
Основич Л. Д. 3, 31
Остроухов В. Д. 5, 17

П

Павлов Г. М. 1, 30
Павловский Р. А. 9, 30
Пасынков В. В. 9, 66
Патрик А. А. 9, 90
Пачаджян Х. Б. 10, 78
Пашенцев И. Д. 7, 34
Пашинский В. Г. 1, 61
Пеклер В. Н. 4, 80
Перельмутер М. М. 1, 52
Петинов О. В. 3, 59
Петканчин Л. 9, 20
Петрова С. С. 1, 30
Петров Л. П. 5, 45; 12, 58
Петров Г. Н. 6, 89
Петров И. И. 9, 92
Петухова Г. П. 5, 13
Пивоваров А. А. 3, 69
Пистрак М. Я. 4, 46
Плис Г. С. 10, 1
Плотницкий А. Э. 12, 81
Покровская В. И. 3, 5
Полизо Г. Д. 12, 79
Половой И. Ф. 8, 12

Полтев А. И. 3, 59; 12, 6
Полушкин И. П. 11, 19
Поляков И. И. 6, 80
Попова В. П. 5, 75
Попов Е. Н. 11, 36
Попков В. И. 2, 84
Портной М. Г. 3, 1; 6, 14
Приклонский Е. Н. 6, 47
Пташкин А. В. 11, 36
Пульер Ю. М. 5, 39
Пустыльников В. М. 12, 47
Путилова А. Т. 6, 19
Пушкин В. Я. 6, 60

Р

Рабинович В. М. 1, 6
Рабинович С. И. 5, 94
Рипс Я. А. 6, 69; 8, 81
Рогов Л. Д. 5, 89
Розанов М. Н. 4, 25
Розенфельд В. Е. 2, 84; 3, 92
Розенблат М. А. 3, 35
Рокотян С. С. 5, 86; 5, 94
Романов А. Д. 5, 94
Рубин В. Б. 2, 13
Рудаков В. Н. 7, 30
Русских А. А. 11, 86
Рыбальченко Ю. И. 7, 89

С

Сабинин Ю. А. 9, 89
Савельев В. П. 6, 26
Самохвалов В. А. 2, 84
Сандлер А. С. 3, 53; 3, 92
Сапожников А. В. 5, 94
Свиридов А. А. 11, 93
Сербиновский Г. В. 3, 92; 5, 94; 9, 88; 12, 74
Сергеев А. С. 2, 88; 6, 92; 10, 93
Серигов В. А. 8, 54
Сидоров Н. Н. 2, 84
Сидельников Б. В. 7, 13
Синьчугов Ф. У. 5, 94
Сипайлов Г. А. 5, 71; 8, 46
Сирота С. М. 1, 69
Сирота И. М. 4, 22
Сиротинский Л. И. 5, 94
Сисоян Г. А. 3, 92
Сисуненко О. И. 8, 38
Ситник Н. Х. 11, 86
Скобелев В. Е. 2, 84
Слежановский О. В. 4, 46
Слепцов М. А. 9, 69
Слепушкин Е. И. 8, 71
Смирнов Э. П. 8, 93
Смординов В. В. 4, 66
Соболев В. С. 2, 82
Соколов А. А. 2, 47
Соколов М. М. 3, 92
Солодовников Г. С. 10, 86
Солдаткина Л. А. 12, 77

Станиславский Л. Я. 1, 6
Стасюк В. Н. 1, 93
Степанов А. Д. 2, 84
Степанов Н. В. 7, 34
Степанян А. А. 9, 91
Стефанович Т. Х. 3, 48
Стома С. А. 10, 32
Ступель А. И. 1, 69; 12, 29
Суд И. И. 5, 63
Сумин А. Р. 2, 33

Т

Тагер П. Г. 9, 79
Тагиров М. А. 6, 19
Тальшинский И. Т. 6, 89
Тардов Б. Н. 6, 95
Татаренко Е. Б. 4, 90
Твердин Л. М. 4, 96
Теслюк Н. Г. 1, 85
Тимофеев Д. В. 3, 5
Тимофеев В. А. 6, 89
Тищенко Н. А. 9, 92
Токарева В. Д. 5, 58
Торопов И. А. 2, 60
Трещев И. И. 2, 42
Трохименко Я. К. 6, 84
Трошин В. А. 9, 76
Троян В. А. 5, 48
Трухан А. П. 5, 91
Тутубалин В. Н. 6, 40

У

Уваров А. И. 1, 72
Ураев В. П. 6, 32
Урип В. Д. 3, 79
Усманов Ф. Х. 1, 90
Усов С. В. 3, 81

Ф

Фабрикант В. Л. 4, 18; 7, 42
Фабрика Л. П. 10, 44
Файбисович Д. Л. 6, 88
Фархи С. Л. 1, 82
Фатеев А. В. 6, 89
Федосеев А. М. 5, 94
Федченко И. К. 2, 90; 11, 58
Фельдман А. В. 7, 79
Фетисов П. А. 4, 77
Фиалков В. М. 11, 43
Фигурнов Е. П. 4, 13; 11, 27
Фикс И. Г. 9, 40
Фишбейн В. Г. 4, 46
Фрейдзон И. Р. 1, 33
Фрумкин А. А. 4, 72

Х

Халилов Ч. С. 11, 32
Хан В. Х. 8, 41
Хачатрян В. С. 2, 22
Хачатуров А. А. 6, 14
Хвостов В. С. 10, 76

Хенкин А. Л. 9, 45
Хорьков К. А. 8, 46
Хрущев А. П. 7, 79

Ц

Цаценкин В. К. 6, 51
Цукерник Л. В. 4, 7; 4, 94
Цукерман И. И. 10, 49

Ч

Чачибая Ц. Ш. 1, 87
Чванов В. А. 10, 66
Чеботарев Е. В. 3, 92
Челноков В. Е. 4, 54
Червоненкис Я. М. 6, 86
Черкасов А. В. 4, 84
Черновец А. К. 3, 81; 5, 88
Чернышов В. И. 3, 19
Чесаченко В. Ф. 4, 91
Чиликин М. Г. 3, 92; 5, 94; 8, 61
Чирвинский В. М. 9, 69
Чистов В. П. 5, 48
Чукбар В. А. 12, 63

Ш

Шалыт Г. М. 1, 17
Шаргородский В. Л. 9, 16
Шацилло О. И. 9, 89
Швецов А. Г. 2, 54
Шейнман А. И. 9, 92
Шелухина Т. И. 11, 21
Шенкман Л. З. 10, 23
Шер И. А. 1, 21
Шеренцис А. Н. 3, 91
Шереметьевский Н. Н. 11, 78

Шилин Н. В. 9, 1
Шипунова Н. П. 4, 90
Шишкин Н. Ф. 3, 92
Шипилло В. П. 11, 63
Шкарик Ю. П. 2, 70
Школьников Б. М. 5, 63
Штробель В. А. 2, 13
Шустер О. И. 11, 78

Щ

Щитова В. М. 8, 71
Щукин М. И. 11, 93

Э

Эйбшниц А. Г. 1, 1; 7, 13

Ю

Юркевич В. М. 1, 77

Я

Якобс А. И. 5, 24; 8, 21
Яковлев А. И. 7, 73
Яковлев Б. С. 10, 75
Яковлев В. П. 12, 22
Яманова Л. В. 5, 95
Янчук Э. И. 7, 7
Яськов Е. С. 6, 80

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

В. В. Афанасьев, А. И. Бертинов, В. Г. Бирюков, В. А. Веников, Б. Б. Воронцов, И. С. Ефремов, Л. А. Жекулин, Д. Г. Жимерин, А. М. Залесский, П. М. Ипатов, М. П. Костенко, В. С. Кулебакин, Л. Г. Мамиконянц (зам. главного редактора), Л. Р. Нейман, И. И. Петров, С. И. Рабинович, Д. В. Разевиг (главный редактор), А. М. Федосеев, М. Г. Чиликин, А. С. Шаталов.

Адрес редакции: Москва, Б. Черкасский пер., д. № 2/10. Телефон К 4-24-80.

Почтовый адрес: Москва, Главный почтамт, абонентный ящик № 648.

Адрес для телеграмм: МОСКВА, ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

СОДЕРЖАНИЕ

В. П. Елютин — Советская высшая электротехническая школа	1	Г. И. Вайднер — Применение электронных цифровых вычислительных машин для всестороннего анализа электрической нагрузки больших промышленных предприятий	70
А. М. Залесский, К. Зибер и А. И. Полтев — Некоторые исследования разрядных напряжений в сжатых газах	6	О. В. Волкова — Электрические характеристики координирующего промежутка на напряжение 750 кВ	72
В. Н. Борин — Некоторые закономерности поверхностного разряда в элегазе (SF ₆)	10		
Г. А. Воробьев и А. А. Воробьев — Электрический пробой твердых диэлектриков	14	СООБЩЕНИЯ	
Л. П. Веретенников и В. П. Яковлев — Вопросы алгоритмизации переходных процессов в автономных электроэнергетических системах	22	Б. А. Константинов и Г. В. Сербиновский — Прогнозы потребления электроэнергии за рубежом	74
А. И. Ступель и В. В. Ильиничнин — Расчет на ЭЦВМ переходных процессов в сложных электрических схемах методом контурных токов	29	Л. А. Солдаткина — О международной шкале стандартных напряжений электрических сетей	77
Д. Н. Морозов — Расчет местных и общих потерь в пластинах, пронизываемых потоком рассеяния трансформаторов или реактора	32	ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ	
К. С. Дмитриев, В. Е. Казанский, Е. П. Королев и Э. М. Либерзон — Метод расчета токовой и угловой погрешности трансформатора тока при глубоком насыщении сердечника	39	Г. Д. Полизо — Первая в России центральная электростанция переменного тока	79
О. П. Махарадзе — О способе сравнения синусоидальных электрических величин	43	ДИСКУССИИ	
В. М. Пустыльников и А. Т. Ахмадиев — Исследование работы электропривода управляемого прямоточного волоочильного стана в режиме разгона	47	К. К. Балашов и А. Э. Плотницкий — К вопросу о целесообразных значениях токов короткого замыкания в распределительных сетях	81
Б. Р. Гендельман — Исследование работы бесконтактной системы управления главным приводом блюминга 1300	52	ХРОНИКА	
Л. П. Петров и В. А. Ладензон — Формирование пусковых процессов асинхронных двигателей включением сопротивлений в цепь статора	58	Профессор Виктор Михайлович Синьков	82
В. А. Чукбар — Использование симметричного питания однофазным током для регулирования скорости трехфазных асинхронных двигателей		Профессор А. К. Дарманчев	82
П. А. Ионкин и В. П. Ващенко — О применении направленных графов и структурных схем для анализа электрических цепей и систем автоматического управления	66	БИБЛИОГРАФИЯ	
		С. Д. Волобринский — Книга Н. А. Казака, Б. А. Князевского, С. С. Лазарева и Д. С. Лившица «Электроснабжение промышленных предприятий»	83
		Указатель материалов, помещенных в журнале «Электричество» в 1967 г.	86



CONTENTS

Fifty Years of the Soviet Electrical Engineering School—V. P. Eliutin	1	Forming Starting Processes in an Induction Motor by Inserting Resistors in the Stator Circuit—L. P. Petrov, V. A. Ladenson	58
On Discharge Voltages in Compressed Gases—A. M. Zaleski, K. Ziber, A. I. Poltev	6	Using Single-phase Symmetrical Supply for Speed Control of Three-phase Induction Motors—V. A. Chukbar	63
Some Relationships on Creeping Discharge in SF ₆ Gas—V. N. Borin	10	Using Flow Graphs and Block Diagrams for Analysing Electrical Circuits and Automatic Control Systems—P. A. Ionkin, V. P. Vaschenko	66
Electrical Breakdown in Solid Dielectrics—G. A. Vorobev, A. A. Vorobev	14	FROM OPERATING EXPERIENCE	
On an Algorithm for Calculating Transients in Independent Electrical Power Systems—L. P. Veretennikov, V. P. Jakovlev	22	Using Digital Computers for Over-all Analysis of the Electrical Load at Large Industrial Plants—G. I. Weidner	70
Calculating Complex Electric Circuit Transients on Digital Computers Using Mesh Equations—A. I. Stupel, V. V. Ilynnichnin	29	Electrical Characteristics of the Insulation Coordination Gap for 750 kV—O. V. Volkova	72
Calculating Local and General Losses in Plates Crossed by Transformer or Reactor Leakage Flux—D. N. Morozov	32	REPORTS	
A Method for Calculating Current Magnitude and Phase Angle Errors for High Saturation of the Current Transformer Core—K. S. Dmitriev, V. E. Kazanski, E. P. Korolev, E. M. Liberson	39	Prospects for Electric Power Consumption Abroad—B. A. Constantinov, G. V. Serbinovski	74
A Method for Comparing Sinusoidal Quantities—O. P. Makharadze	43	On the International Standard for Network Voltages—L. A. Soldatkina	77
The Performance of the Electrical Drive for a Controlled Drawing Mill During Acceleration—V. M. Pustilnikov, A. T. Akhmadiev	47	FROM THE HISTORY OF ELECTRICAL ENGINEERING	79
The Performance of the Contactless Control System for the Main Drive in a Type 1300 Blooming Mill—B. R. Hendelman	52	DISCUSSION	81
		CHRONICLE	82
		BIBLIOGRAPHY	83



Прослеживается путь развития советской высшей электротехнической школы за 50 лет Советской власти. Говорится о мероприятиях партии и правительства, направленных на усовершенствование высшего технического образования в стране. Подчеркиваются некоторые особенности организации учебного процесса в разных институтах страны.

Значительная часть статьи посвящена научной деятельности высших учебных заведений, их связи с электротехническим производством. Намечаются основные научные проблемы, стоящие перед коллективами вузов в основных областях электротехники. Табл. 1.

УДК 621.3.048.83

Некоторые исследования разрядных напряжений в сжатых газах.

Залесский А. М., Зибер К., Полтев А. И.,
«Электричество», 1967, № 12

Исследования, о которых говорится в статье, проводились при переменном токе промышленной частоты и при давлениях от 1 до 11 атм.

Выяснилось, что наиболее высокое разрядное напряжение получается в том случае, когда верхний электрод и изолятор имеют одинаковый диаметр. Зависимость разрядного напряжения от давления имеет один или два относительных максимума. Пробивное напряжение сжатого газа при расстояниях между электродами, равных высоте изолятора (при отсутствии последнего), были меньше разрядного напряжения. Исключение представляет элегаз, в котором пробивное напряжение равно или больше разрядного при давлениях, меньших 2 атм.

Сравнение разрядных напряжений в сжатом воздухе и элегазе указывает на то, что в элегазе разрядное напряжение превосходит таковое в воздухе в 2,2–2,6 раз. Илл. 8, библи. 8.

УДК 621.3.048.83

Некоторые закономерности поверхностного разряда в элегазе (SF_6).

Борин В. Н., «Электричество», 1967, № 12

Рассмотрены некоторые закономерности поверхностного разряда в неоднородном поле в элегазе. Основное внимание уделяется исследованиям при воздействии импульсного напряжения. Испытания изоляции проводились в условиях, близких к тем, которые будут иметь место в реальных конструкциях элегазовой изоляции. Илл. 8, библи. 2.

УДК 621.315.611.015.51

Электрический пробой твердых диэлектриков.

Воробьев Г. А., Воробьев А. А., «Электричество», 1967, № 12

Приводится обзор данных по электрическому пробую (ЭП) твердых диэлектриков (ТД) в значительной части по работам, проведенным в Томском политехническом институте. Установленное электрическое упрочнение ТД с уменьшением толщины позволяет считать, что ЭП обусловлен ударной ионизацией.

Показано, что развитие разряда с анода обусловлено электронно-фотонным механизмом, а с катода — плавлением щелочно-галогенидного кристалла. Время разряда претерпевает скачок при некоторой толщине $d_{кр}$, которая возрастает с уменьшением перенапряжения. Показано наличие лавиностримерного и многостримерного механизма ЭП $m_{г}$, в связи с чем вводятся понятия «толстого» и «тонкого» образца. В твердых диэлектриках малой толщины обнаружены электронные токи эмиссии с катода и ударной ионизации. Наличие неоднородностей на поверхности катода приводит к снижению электрической прочности ($E_{пр}$), а ЭП обусловлен плавлением кристалла током эмиссии с неровности на катоде. Формулируются три стадии при ЭП $m_{г}$: стадия формирования разряда, стадия завершения разряда, послепробойная стадия. В заключение приводятся некоторые замечания по теориям ЭП $m_{г}$, о выборе характерного значения $E_{пр}$ о задачах дальнейших исследований. Табл. 1. Библи. 67. Илл. 6.

УДК 621.311:681.142

Вопросы алгоритмизации переходных процессов в автономных электроэнергетических системах.

Веретенников Л. П., Яковлев В. П.,
«Электричество», 1967, № 12

В статье рассмотрены особенности алгоритмов установившегося режима и токов короткого замыкания для типовой схемы АЭС и их реализация на ЦВМ.

Показывается, что алгоритм и программа расчета установившегося режима, построенные на базе уравнений в осях q, d , являются нераціональными из-за плохой сходимости процесса расчета. Рациональным является алгоритм, построенный на основе уравнений в комплексном виде.

Приводится и описывается блок-схема программы расчета установившегося режима, реализующая этот алгоритм.

Приводятся исходные положения для составления алгоритма токов короткого замыкания АЭС. Рекомендуется строить его на основе уравнений в переменных φ . Освещается вопрос о вычислении на ЦВМ начального фазного тока короткого замыкания и действующего значения тока в переходном режиме, а также рациональность программы без автоматического выбора шага.

Приводится и описывается блок-схема программы расчета токов короткого замыкания.

В приложениях приводятся основные зависимости, положенные в основу составления рассмотренных алгоритмов. Табл. 1. Илл. 8. Библи. 2.

Расчет на ЭЦВМ переходных процессов в сложных электрических схемах методом контурных токов.

Ступель А. И., Ильиничин В. В.,
«Электричество», 1967, № 12

Все контуры схемы делятся на три группы: составленные только из емкостей, из емкостей и активных сопротивлений и из емкостей, активных сопротивлений и индуктивностей. Такая классификация позволяет получить систему уравнений, разрешенных относительно первой производной. Илл. 3, библи. 3.

УДК /621.314.01+621.318.43/.017.3.001.24

Расчет местных и общих потерь в пластинах, пронизываемых током рассеяния трансформатора или реактора.

Морозов Д. Н. «Электричество», 1967, № 12

Показано, что значение максимальной плотности тока σ_m в пластине, которое можно характеризовать коэффициенты k_σ , зависит от распределения поля, от положения пластины относительно поля и от отношения длины, занятой полем, к ширине пластины: $\sigma_m = k_\sigma \sigma_0$, где σ_0 — максимальная плотность тока в бесконечно длинной пластине при равномерном распределении поля.

Даны формулы и кривые для расчета некоторых эппор полей простых форм. При сложной форме эппоры поля ее можно разложить на простые составляющие и определять плотности тока методом наложения. Приведен ряд графиков распределения токов для относительно сложных форм эппор поля. На основе полученных теоретических результатов уточнена методика расчета местных и общих потерь в крайних пакетах и в стержневых немагнитных пластинах трансформаторов при треугольной эппоре поля (РЖЭ. 1965, 6. И. 187), а также при любой форме, показан расчет токов во вставке стержневого реактора. Сопоставление расчетов и измерений на модели и трансформаторах дало погрешность меньше 10%. Табл. 2, библи. 3, илл. 5.

УДК 621.314.224

Метод расчета токовой и угловой погрешностей трансформаторов тока при глубоком насыщении сердечника.

Дмитриев К. С., Казанский В. Е., Королев Е. П.,
Либерзон Э. М., «Электричество», 1967, 1967, № 12

Рассказывается о методе расчета погрешностей трансформатора тока, основанном на замене реальной характеристики намагничивания сердечника прямоугольной безгистерезисной характеристикой.

Приведены универсальные характеристики токовой и угловой погрешностей, пользуясь которыми можно быстро оценивать погрешности любого трансформатора тока по заданным значениям первичного тока и сопротивления вторичной нагрузки с учетом импедансного угла, оценивать допустимое значение сопротивления вторичной нагрузки или определять допустимую кратность первичного тока для данной нагрузки.

Метод расчета погрешностей, о котором говорится в статье, рекомендуется для трансформаторов тока в схемах релейной защиты, работающих при глубоком насыщении сердечника и токовой погрешности, превышающей 20–25%, т. е. в условиях, для которых общепринятые методы расчета дают неприемлемые расхождения с опытом.

Приведены результаты экспериментальной проверки предлагаемого метода расчета. Табл. 1, илл. 6, библи. 5.

УДК 621.316.925

О способе сравнения синусоидальных электрических величин,

Махарадзе О. И., «Электричество», 1967, № 12

В статье предлагается новый способ получения характеристик реле в комплексной плоскости, отличных от круговых и прямоллинейных. Способ основан на обычной схеме сравнения абсолютных значений двух электрических величин. При этом входные выпрямители схем сравнения включены на выходы фильтров основной и второй гармоник, а на параллельно включенные входы фильтров основной и второй гармоник подается суммарное напряжение от формирующих устройств, на каждое из которых подан один из сравниваемых сигналов. Основное преимущество способа заключается в том, что вид граничной линии срабатывания реле становится регулируемым.

В статье дается общее уравнение граничной линии срабатывания и анализ этого уравнения. Библи. 3, илл. 3.

УДК 621.778.1.06-83

Исследование работы электропривода управляемого прямооточного волюличного стана в режиме разгона.

Пустыльников В. М. и Ахмадиев А. Т.,
«Электричество», 1967, № 12

Рассматривается прямооточный волюличный стан с системой автоматического управления, представляющий собой систему стабилизации всех противонапряжений в стане. Приводятся уравнения, описывающие работу стана в статическом режиме. Решением этих уравнений находятся формулы, позволяющие оценить величины противонапряжений и скоростей вращения двигателя стана, устанавливающиеся в результате разгона. Динамика процесса разгона исследована на электронной модели. Представленные осциллограммы изменений противонапряжений при разгоне подтверждают удовлетворительный характер процессов.

Приведенные в работе соотношения позволяют произвести полный расчет параметров системы. Указываются пути реализации системы на существующих прямооточных станах. Табл. 1, илл. 4, библи. 4.

УДК 621.771.35

Исследование работы бесконтактной системы управления главным приводом блюминга 1300.

Гендсльман Б. Р., «Электричество», 1967, № 12

Рассматривается работа бесконтактной системы управления главным приводом сверхмощного блюминга 1300 с ионным возбуждением прокатных машин. Дан анализ динамических процессов и приведены экспериментальные данные, характеризующие работу главного привода. Табл. 6, библи. 3, илл. 6.

УДК 623.313.333.025.3:621.3.016.352

Формирование пусковых процессов асинхронных двигателей включением сопротивлений в цепь статора.

Петров Л. П. и Ладензон В. А., «Электричество», 1967, № 12

При использовании асинхронных короткозамкнутых двигателей в электроприводах, работающих с большой частотой пусков, возникают задачи ограничения ударных значений переходных моментов и формирования переходных процессов, которые в ряде случаев могут решаться путем включения в цепь статора сопротивлений различного характера. В этом плане наибольший интерес представляет пуск двигателя через сопротивления емкостного характера, который из-за сложности аналитического исследования совершенно не освещен в технической литературе. Исследования переходных процессов при пуске через предвключенные сопротивления, проведенные на электронных моделях, показывают, что предвключенные сопротивления емкостного характера следует рассматривать не только как средство компенсации падения напряжения в линии, но и как способ формирования переходного процесса.

В статье рассмотрены особенности расчета переходных процессов асинхронных двигателей при пуске с предвключенными активными, индуктивными и емкостными сопротивлениями. Табл. 1, рис. 6, библи. 4.

УДК 621.316.718.5:621.313.333

Использование симметричного питания однофазным током для регулирования скорости трехфазных асинхронных двигателей.

Чукбар В. А., «Электричество», 1967, № 12

Предлагается метод, позволяющий получить утроение числа полюсов на обычном трехфазном двигателе, а не на специальном, многополюсном. При переходе с обычного числа полюсов на утроенное машина работает генератором, что позволяет использовать этот режим для предварительного торможения двигателей. Для перевода трехфазных двигателей в однофазный режим предлагается схема разомкнутого треугольника. Аналитическое исследование, подтвержденное экспериментами, показывает, что в однофазном режиме все три тока: холостого хода, короткого замыкания и нагрузочный — близки по величине.

Исследуется также кривая момента в однофазном режиме и доказывается, что в ее выражении M_k представляет собой критический момент того же двигателя при трехфазном режиме работы, однако фазное напряжение и обмоточный коэффициент соответствуют однофазному режиму. Статья заканчивается выводами о целесообразности применения данного метода. Илл. 5, библи. 6.

УДК 621.3.011.1

О применении направленных графов и структурных схем для анализа электрических цепей и систем автоматического управления.

Ионкин П. А., Ващенко В. П., «Электричество», 1967, № 12

Показывается, что структурные или так называемые операторные схемы, широко применяемые для исследования электрических цепей и систем автоматического управления, являются по существу направленными графами. Поэтому методы расчета таких схем должны сводиться к известным топологическим методам. Устанавливается связь между формулами для структурных схем и для направленных графов, отмечаются их некоторые особенности. Библи. 8, илл. 6.

Электрические характеристики координирующего промежутка на напряжение 750 кв.

Волкова О. В., «Электричество», 1967, № 12

Приведены данные по исследованию электрических характеристик координирующего промежутка 750 кв при импульсных волнах 1,5/40 мксек положительной и отрицательной полярностей, при плавном подъеме напряжения промышленной частоты и при коммутационной волне частоты 125 гц.

Испытания показали, что можно сконструировать простой и достаточно надежный координирующий промежуток, располагая его на натяженной гирлянде изоляторов. Промежуток следует выполнить в виде двух стальных труб со сферами диаметром 200 мм по концам. При наличии на подстанции двух разрядников расстояние между электродами следует брать 3,0 м.

Характеристики координирующего промежутка позволяют выбирать нужное расстояние между электродами таким образом, чтобы ограничить амплитуду набегающей волны грозового перенапряжения, и в то же время исключить срабатывание промежутка при внутренних перенапряжениях. Илл. 2, библи. 2.

УДК 621.3.027

О международной шкале стандартных напряжений электрических сетей.

Солдаткина Л. А., «Электричество», 1967, № 12

Излагаются основные положения выпущенной в 1967 году Техническим Комитетом № 8 Международной Электротехнической Комиссии (МЭК) Публикации № 38 «Стандартные напряжения МЭК». Анализируются трудности, имеющие место при разработке международной шкалы стандартных напряжений электрических сетей и наивысших напряжений для электрооборудования. Сообщаются основные задачи, стоящие перед Техническим Комитетом № 8 МЭК и Национальными Комитетами МЭК в отдельных странах при подготовке следующего 5-го издания Публикации № 38 и при дальнейшей работе по созданию международной шкалы стандартных напряжений. Таблиц 6.

УДК 621.31(100)

Прогнозы потребления электроэнергии за рубежом.

Константинов Б. А., Сербиновский Г. В., «Электричество», 1967, № 12

В статье приводится обзор прогнозов потребления электроэнергии за рубежом на основе данных Европейской экономической комиссии Организации Объединенных Наций. Подробно рассматриваются четыре основных метода прогнозирования и область их применения.

Статья представляет интерес для энергетиков, работающих в плановых и проектных организациях. Библи. 2.

УДК 621.316.1 : 621.3.064.1

К вопросу о целесообразных значениях токов коротких замыканий в распределительных сетях (по поводу статьи доктора технических наук, профессора И. А. Сыромятникова).

Балашов К. К., Плотницкий А. Э., «Электричество», 1967, № 12

Дается положительная оценка обсуждаемой статьи и подчеркивается актуальность поднятых в ней вопросов. Приводятся некоторые результаты проведенных авторами исследований оптимальных величин напряжения короткого замыкания трансформаторов распределительных сетей, подтверждающие технико-экономическую целесообразность пересмотра напряжений короткого замыкания для ряда типов трансформаторов, как части решения задачи определения оптимальных значений токов короткого замыкания в распределительных сетях. Табл. 1. Библи. 2.

ОТКРЫТА ПОДПИСКА

на ЖУРНАЛЫ, издательства «ЭНЕРГИЯ» на 1968 г.

«ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»

Научно-технический журнал
Орган Академии наук СССР,
Государственного комитета
Совета Министров СССР
по науке и технике
и Центрального правления
Научно-технического общества
энергетической промышленности

Год издания 88-й 12 номеров в год

Подписная цена:

на год — 9 р. 60 к.,

на 6 мес. — 4 р. 80 к.

Цена одного номера 80 коп.

«ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА»

Научно-технический журнал
Орган Академии наук СССР,
Государственного комитета
Совета Министров СССР
по науке и технике
и Центрального правления
Научно-технического общества
энергетической промышленности

Год издания 15-й 12 номеров в год

Подписная цена:

на год — 9 р. 60 к.,

на 6 мес. — 4 р. 80 к.

Цена одного номера 80 коп.

«СВЕТОТЕХНИКА»

Научно-технический
и производственный журнал
Орган Министерства
электроэнергетической промышленности
СССР
и Центрального правления
Научно-технического общества
энергетической промышленности

Год издания 14-й 12 номеров в год

Подписная цена:

на год — 3 р. 60 к.,

на 6 мес. — 1 р. 80 к.

Цена одного номера 30 коп.

«ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ»

Производственно-технический журнал
Орган Министерства энергетики
и электрификации СССР
и Центрального правления
Научно-технического общества
энергетической промышленности

Год издания 39-й 12 номеров в год

Подписная цена:

на год — 9 р. 60 к.,

на 6 мес. — 4 р. 80 к.

Цена одного номера 80 коп.

«ЭНЕРГЕТИК»

Производственно-массовый журнал
Министерства энергетики
и электрификации СССР
и Центрального комитета профсоюза
рабочих электростанций
и электротехнической промышленности

Год издания 16-й 12 номеров в год

Подписная цена:

на год — 2 р. 40 к.,

на 6 мес. — 1 р. 20 к.

Цена одного номера 20 коп.

«ЭЛЕКТРОТЕХНИКА»

Научно-технический журнал
Министерства электротехнической
промышленности СССР
и Центрального правления
Научно-технического общества
энергетической промышленности

Год издания 39-й 12 номеров в год

Подписная цена:

на год — 8 р. 40 к.,

на 6 мес. — 4 р. 20 к.

Цена одного номера 70 коп.

«ЭНЕРГОХОЗЯЙСТВО ЗА РУБЕЖОМ»

(Приложение к журналу
«Электрические станции»)

Производственно-технический журнал
Орган Министерства энергетики
и электрификации СССР
и Центрального правления
Научно-технического общества
энергетической промышленности

Год издания 13-й 6 номеров в год

Подписная цена:

на год — 2 р. 40 к.,

на 6 мес. — 1 р. 20 к.

Цена одного номера 40 коп.

«ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА»

Производственно-технический журнал
Орган Министерства энергетики
и электрификации СССР
и Центрального правления
Научно-технического общества
энергетической промышленности

Год издания 23-й 12 номеров в год

Подписная цена:

на год — 4 р. 80 к.,

на 6 мес. — 2 р. 40 к.

Цена одного номера 40 коп.

«ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО»

Научно-технический
и производственный журнал
Министерства энергетики
и электрификации СССР
и Центрального правления
Научно-технического общества
энергетической промышленности

Год издания 38-й 12 номеров в год

Подписная цена:

на год — 7 р. 20 к.,

на 6 мес. — 3 р. 60 к.

Цена одного номера 60 коп.

Произвести подписку на журналы можно у общественных распространителей печати в пунктах подписки «Союзпечать» по месту работы и учебы, в агентствах «Союзпечати», а также в любом почтамте и отделении связи.