



ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1983

•ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ•

12

УДК 621.311.016.352.001.57

Применение цифро-аналого-физического комплекса для исследования динамических режимов и устойчивости электроэнергетических систем

БУШУЕВ В. В.

Новосибирск

Моделирование сложных объектов и систем является необходимым этапом не только познавательной исследовательской, но и практической созидательной, управленческой деятельности человека. В условиях автоматизированного диспетчерского управления электроэнергетическими системами происходит сращивание функций моделирования и управления. С одной стороны, это связано с тем, что действия диспетчерского персонала автоматических устройств приводят, как правило, к изменению режимных ситуаций во всей системе. В условиях многообразия исходных режимов, достаточно близких к предельным, возможные последствия этих действий могут быть неоднозначны. Заранее предсказать будущее состояние системы во многих случаях практически невозможно.

Например, величина предельного по условиям устойчивости перетока по межсистемной связи Сибирь — Казахстан меняется почти в 2 раза в зависимости от поточкораспределения внутри самих энергосистем. Увеличение рабочего межсистемного перетока на одну и ту же величину в одном случае может быть абсолютно безопасным с точки зрения надежности работы объединения, в другом — приведет к нарушению устойчивости и может вызвать каскадное развитие аварии.

Поэтому управление должно предваряться имитационным моделированием динамических режимов сложной системы. Необходимость оперативного управления электроэнергетическими объектами предъявляет особые повышенные требования к быстродействию используемых моделей. Цифровые вычислительные машины не всегда удовлетворяют этим требованиям, особенно если ставится задача имитации динамики проведения системы с точки зрения оценки условий ее устойчивости.

С другой стороны, реализация принятых в результате моделирования управляющих решений должна осуществляться с помощью технических средств, входящих в комплекс АСДУ. Для того чтобы обеспечить совпадение реакции на управляющее воздействие самого объекта и его модели, необходимо обеспечить функциональную близость управляемой модели объекта и оригинала. Поэтому особенности цифрового управления электроэнергетическими объектами, осуществляемого с помощью микропроцессоров и управляющих ЭВМ, целесообразно имитировать аналого-цифровыми же устройствами моделирования. Необходимость предварительной комплексной отладки алгоритмов управления в замкнутом контуре предопределяет необходимость использования в качестве моделирующих устройств тех же технических средств АСДУ, которые будут использованы и при управлении. Имитацию же поведения объекта управления с учетом реальных условий многорежимности, нестационарности и нелинейности свойств электроэнергетических систем при такой комплексной отладке целесообразно осуществлять с помощью физических моделей.

Все это говорит о том, что одним из основных инструментов для системного анализа сложных управляемых электроэнергетических объектов являются гибридные цифро-аналого-физические модельные комплексы (ЦАФК).

Подобные комплексы созданы и создаются в ряде исследовательских центров нашей страны и за рубежом для моделирования нормальных и аварийных режимов электроэнергетических систем с традиционными и новыми объектами и для отработки алгоритмов автоматизированного и автоматического управления с помощью ЭВМ.

Модельный комплекс СибНИИЭ и предназначен глав-

ным образом для исследования динамических свойств управляемых электроэнергетических объектов и систем. Физическая часть этого комплекса включает в себя 11 модельных генераторов с перестраиваемыми параметрами, соответствующими особенностями современных крупных гидро- и турбогенераторов, а также модель ВЛ сверхвысокого напряжения общей протяженностью свыше 20 тыс. км. Кроме того, в составе электродинамической модели имеются физические модели двигательной и статической нагрузки, статических тиристорных компенсаторов и реакторов, индуктивных накопителей и контакторы, имитирующие действие коммутационной аппаратуры.

Наличие достаточно полной физической модели высоковольтных линий позволило осуществить неоднократные комплексные исследования режимов и устойчивости ЕЭЭС, особенно ее восточной части, при наличии не только межсистемных связей сверхвысокого напряжения, но и транспортных электропередач переменного тока полуволнового типа для выдачи мощности крупных ГРЭС.

Эти исследования позволили убедиться не только в технической работоспособности, но и в хорошей управляемости таких электропередач в нормальных и аварийных режимах.

Подробное физическое моделирование было проведено и в период подготовки к объединению на параллельную работу ОЭС Сибири и ОЭС Казахстана для выявления условий надежной работы такого объединения. В настоящее время на модели ведутся экспериментальные исследования надежности работы ОЭС Востока в связи с ее предстоящим объединением с ОЭС Сибири.

Необходимо отметить, что физические модельные эксперименты в отличие от расчетов на ЦВМ позволяют осуществить комплексное исследование режимов и устойчивости объединения, что дало возможность выявить некоторые принципиально новые свойства сложных протяженных систем: самовозбуждение и самораскачивание «эффект полуволны», связанный с появлением резонансных перенапряжений в точках, удаленных от места короткого замыкания на расстояние, определяемое углом 180° .

Поэтому физическое моделирование, на наш взгляд, принципиально необходимо при исследованиях надежности сложных систем не для получения всей гаммы количественных результатов, а для установления новых явлений и свойств таких систем и их комплексного анализа.

Особое значение приобретают физические модельные исследования поведения системы при наличии новых объектов, на сегодняшний день либо не имеющих достаточно апробированного математического описания, либо степени подробности описания которых не соответствует степени абстракции математических моделей всей системы.

Таким новым системным элементом, предназначенным для управления межсистемными потоками мощности, являются сверхпроводящие индуктивные накопители (СПИН), моделирование которых как в «теплом», так и в «холодном» варианте осуществляется в СибНИИЭ.

Учитывая наше постоянное внимание к проблеме повышения пропускной способности высоковольтных электропередач, в составе электродинамической модели была создана физическая модель комбинированной высоковольтной линии (КВЛ) с двухъярусным расположением цепей разного уровня сверхвысокого напряжения. Для

таких линий важное значение приобретает моделирование взаимных индуктивных связей, правильная имитация которых необходима для решения проблемы снижения перенапряжений и управления коммутациями КВЛ.

Так, в цикле однофазного АПВ таких линий требуется осуществить более десятка коммутационных операций, причем необходимо обеспечить контроль за погасанием дуги подпитки, а в случае большой нагрузки обеспечить устойчивость динамического перехода. Все это потребовало создания не только самой модели КВЛ, но и разработки достаточно сложных алгоритмов управления, ориентированных на возможности цифровых управляющих вычислительных машин (УВМ).

Необходимо отметить, что любой новый элемент энергосистемы не может рассматриваться обособленно изолированно от поведения объединения в целом. Поэтому главной задачей моделирования мы считали и считаем необходимость рассмотрения динамических свойств сложной системы при наличии такого элемента, выработку и анализ общесистемных требований к характеристикам отдельных объектов и их системам управления.

В этой связи особое значение приобретает проблема автоматизации модельных экспериментов. Мы начали решать эту проблему еще в начале 70-х годов, создав специальную стойку сопряжения ЦВМ БЭСМ-4 с объектом. Наличие каналов ввода и вывода информации обеспечило возможность цифровой регистрации режима работы элементов физической модели. Для четырех модельных агрегатов типа МТ-5 (с тиристорным приводом и модельными АРВ) была полностью автоматизирована система контроля и управления напряжения и активной мощности. Кроме того, по каналам дискретного управления предусмотрена возможность по командам ЦВМ автоматической коммутации контакторами всех модельных агрегатов, а также возможность оперативного переключения четырех блоков генератор — трансформатор из одной схемы первичной коммутации в другую.

Для обеспечения ввода информации в ЦВМ были созданы специализированные быстродействующие датчики мгновенных значений тока, частоты, фазы, датчики мощности с цифровым и аналоговым выходом.

Вторая очередь автоматизации электродинамической модели была связана с использованием УВМ ЕС-1010. Устройства связи УВМ с объектом позволяют осуществить передачу аналоговой информации по 64 каналам и дискретной информации о положении 246 контакторов, а также обеспечить непрерывно-дискретное управление объектом по командам УВМ. Наличие в составе модели УВМ того же типа, что и реальные технические средства АСДУ, позволило реализовать не только принципы, но и конкретные технологические алгоритмы и рабочие программы АСУ ТП ряда объектов.

В частности, были проведены модельные испытания системы управления электрическим торможением гидротурбогенераторов для Зейской ГЭС, реализующей более сложный алгоритм многократного включения и отключения устройств торможения с использованием местных параметров (отклонения частоты и угла от установившегося режима). Предложенный алгоритм позволяет вводить торможение на отрезок времени, пропорциональный величине возникающего при аварии возмущения. Достаточно сложная линия переключения в зависимости от сочетания режимных параметров обеспечивает требуемую устойчивость динамического перехода при коротких замыканиях.

Аналогичную цель преследует и алгоритм адаптивного управления ОАПВ ВЛ 500 кВ, обеспечивающий контроль погасания дуги и исключающий возможность повторного включения на неустранившееся короткое замыкание.

Аналоговые устройства управления торможением и ОАПВ, проведенные на электродинамической модели, включены в эксплуатацию на Зейской ГЭС и позволили повысить надежность работы этой станции в объединении ОЭС Востока. Однако в полной мере преимущества таких адаптивных алгоритмов могут быть реализованы лишь при создании автоматического цифрового управления электростанцией. Предварительное моделирование такой системы в замкнутом контуре ЦВМ — электродинамическая модель позволяет ускорить процесс создания и внедрения АСУ ТП конкретных энергообъектов.

Для расширения своих возможностей электродинамическая модель через коммутационную панель по 100 независимым каналам связана с гибридной (цифро-аналоговой) вычислительной системой (ГВС). Эта система, построенная на базе серийных АВМ и ЦВМ, является наиболее удобным инструментом для создания оперативных моделей энергосистем с целью анализа их динамических режимов и устойчивости. Гибридная вычислительная система позволяет в темпе процесса и даже в уско-ряющем масштабе времени выбрать оптимальную стратегию управления, которая реализуется затем при подаче управляющих воздействий не реальный объект, либо на его физическую модель. Такая ГВС может служить элементом самой адаптивной системы управления с эталонной или самонастраивающейся моделью объекта и входить составной частью в комплекс технических средств АСУ.

Вместе с тем гибридная система может существовать и как самостоятельный цифро-аналоговый вычислительный комплекс, предназначенный для экспресс-анализа динамических режимов сложных электроэнергетических систем. Созданная в СибНИИЭ ГВС прошла несколько этапов своего развития. Вначале была создана аналого-цифровая система на базе крупной АВМ МН-17М и цифровой БЭСМ-4. Затем были состыкованы две АВМ МН-18 с модернизированной ЦВМ МИР-2.

В настоящее время создается третья очередь аналого-цифровой системы, состоящая из серийно выпускаемых аналоговых машин АВК-2(3), связанных с УВМ СМ-1 (СМ-4) а через нее с крупной ЕС-1060 в единый многомашинный комплекс.

Эффективность использования ГВС существенно зависит от принятого способа разделения задач между различными частями комплекса. Если при использовании физического моделирования электроэнергетических объектов и систем на долю аналоговых машин остается лишь моделирование турбин и первичных регуляторов скорости, а с помощью ЦВМ имитируется поведение цифровых систем управления, то в аналого-цифровых комплексах декомпозиция задачи может быть неоднозначной. На наш взгляд, в этом случае целесообразно использовать логико-динамический принцип: моделировать динамические, в первую очередь генераторные звенья, с помощью аналоговых машин, обеспечивающих за счет параллельного интегрирования дифференциальных уравнений необходимое быстрое действие, а статические элементы сети и логические устройства автоматики и управления имитировать с помощью ЦВМ.

Для того чтобы аналоговые схемы моделирования ге-

нераторов не оказались даже кратковременно разомкнутыми, целесообразно имитировать величину собственной проводимости примыкающей системы также на аналоговой машине. Тогда все схемы аналогового моделирования оказываются автономными на период отладки, а с помощью ЦВМ осуществляется дорасчет режима за счет учета взаимных проводимостей сети. Цифровое моделирование сети осуществляется в два этапа: вне «темпа процесса» заранее для заданной схемы осуществляется расчет матрицы проводимостей, а в «темпе процесса» осуществляется лишь перемножение вектора сигналов с выхода аналоговой модели генераторов на соответствующие значения проводимостей и обратная засылка через цифро-аналоговый преобразователь сигналов в аналоговую модель. При этом, учитывая различную скорость протекания процессов изменения электромагнитных и электромеханических режимных координат (тока и угла), для различных переменных может быть использована различная частота квантования по времени.

Опыт гибридного моделирования сложных систем показал, что с их помощью «в темпе процесса» удастся осуществить анализ динамических процессов в многомашинных (до 15 генераторов) электрических схемах с погрешностью в определении установившихся режимов, не превышающей 5 %.

Результаты гибридного моделирования были использованы при создании расчетно-имитационной модели энергообъединения для тренажера диспетчерского персонала ОДУ Сибири. В настоящее время разрабатывается тренажер для ОДУ Востока.

Наличие в составе ГВС аналоговых генераторов «белого шума», управляемых по командам ЦВМ, позволяет имитировать поведение системы при воздействии случайных возмущений с заданными спектральными и статистическими характеристиками.

Подобная модель была использована при исследовании режимной надежности работы межсистемной связи Сибирь — Казахстан с учетом нерегулярных колебаний мощности, статистические характеристики которых имитировались на основе полученных экспериментальных данных.

Помимо экспресс-расчетов динамических режимов, ГВС позволяют, также как и автоматизированные электродинамические модели, осуществлять моделирование цифровых систем управления. При этом, конечно, невозможно предусмотреть для каждого случая использование именно той же УВМ, которая будет использована для каждой конкретной АСУ.

С этой целью, учитывая наличие в составе ГВС большой универсальной ЦВМ, вначале БЭСМ-4, а теперь и ЕС-1060, на этих машинах был разработан специальный имитатор, позволяющий вести программирование и отладку рабочих программ цифрового управления УВМ типа ТА-100 даже при отсутствии таких машин. В частности, такое предварительное использование модели УВМ позволило на 1,5—2 года ускорить разработку программного обеспечения для АСУ Красноярской ГЭС, в том числе подсистем контроля и регулирования напряжения и группового регулирования реактивной мощности.

Связанная с электродинамической моделью ГВС оказалась удобным инструментом для комплексной отладки информационно-измерительной системы в составе АСУ ТП на подстанциях сверхвысокого напряжения.

Реальные значения режимных параметров, поступающие с реальных датчиков физической модели, смешива-

ются со случайными сигналами управляемого ЦВМ генератора «белого шума», имитирующими флуктуации режима и помехи в каналах связи. Эти суммарные сигналы поступают затем в УВМ СМ-1. Моделируя в условиях, близких к реальным, весь тракт прохождения информационных сигналов от объекта до экрана дисплея, на основе анализа энтропийных оценок были выявлены участки с наибольшим искажением информации.

В результате гибридного моделирования были сформулированы требования к помехоустойчивости каждого звена информационного канала, в том числе и к алгоритмам оценки и первичной обработки сигналов, осуществляемым в самой цифровой машине.

Учитывая, что в условиях высоковольтных подстанций наиболее интенсивному воздействию помех подвергаются именно аналоговые каналы связи, была обоснована двухуровневая иерархическая система управления электроэнергетическими объектами с использованием микропроцессоров для первичной обработки информации и локального управления и центральной координирующей УВМ.

Подобная иерархическая система цифрового управления принята как основной вариант проекта АСУ подстанций 500 кВ в ОЭС Урала.

Учитывая необходимость и для других объектов использования иерархических систем управления, сейчас в составе ЦАФК создается модель такой системы с использованием микропроцессоров типа «Электроника-60» и управляющей машиной СМ-4.

С помощью ГВС были проанализированы особенности

цифровой системы управления частотой и активной мощностью для ОЭС Средней Волги с целью повышения режимной надежности работы энергообъединения и сформулированы требования к техническим средствам управления, регулировочному диапазону и скоростям изменения мощности станций. Для того чтобы иметь возможность «в темпе процесса» анализировать режим работы системы при возникновении возмущений и подаче управляющих воздействий, для цифровой части комплекса была создана специальная программа оперативного расчета потокораспределения, на порядок превышающая по быстродействию возможности существующих программ расчета нормального режима.

Эта же программа используется и для моделирования адаптивной системы противоаварийной автоматики, проектируемой в составе АСУ Зейской ГЭС и предназначенной для повышения надежности ОЭС Востока.

Анализируя опыт использования цифро-аналого-физических модельных комплексов для решения задач электроэнергетики, можно сделать вывод, что применение гибридных моделирующих систем позволяет осуществить комплексное рассмотрение режимов и устойчивости электроэнергетических объединений в нормальных и аварийных условиях и осуществить близкое к реальному моделирование систем цифрового управления электроэнергетическими объектами.

Все это позволяет считать ЦАФК одним из основных инструментов для проведения системного анализа управляемых электроэнергетических объектов и объединений с целью обеспечения надежности их работы.

[22.09.82]

УДК 621.316.925

Влияние разряда емкости поврежденной фазы на переходный процесс при замыканиях на землю в кабельных сетях 3—10 кВ

ШУИН В. А., канд. техн. наук

Ивановский энергетический институт

В переходном процессе при замыкании фазы на землю $K_3^{(1)}$ условно выделяют две стадии, связанные соответственно с разрядом емкости поврежденной фазы и зарядом емкостей неповрежденных фаз [1]. В соответствии с этими стадиями в токах нулевой последовательности переходного процесса i_0 поврежденного и неповрежденных присоединений различают две составляющие: высокочастотный разрядный ток i_{0p} (частота от единиц до сотен килогерц) и среднечастотный зарядный ток $i_{0з}$ (частоты приблизительно от 200 до 5000 Гц).

При исследованиях переходных процессов при $K_3^{(1)}$ в кабельных сетях 3—10 кВ с целью разработки и анализа действий устройств селективной сигнализации и защиты от замыканий на землю (УСЗ) влиянием составляющей i_{0p} (затухающей обычно в течение десятков или иногда сотен микросекунд) на значения (амплитудные, интегральные) и фазовые соотношения (соотношения знаков мгновенных значений, моменты переходов через нулевые значения) переходных токов i_0 в присоединениях часто пренебрегают [2—4]. Полученные при указанном допущении результаты приемлемы не во всех случаях, по-

скольку иногда токи разряда i_{0p} могут оказывать существенное влияние как на значения, так и на фазовые соотношения электрических величин переходного процесса. На практике такие условия можно ожидать в первую очередь в кабельных сетях, содержащих неактивные линии малой протяженности (например, сети собственных нужд электростанций), где удаление точек $K_3^{(1)}$ от шин источника питания и, следовательно, уменьшение амплитуд токов i_{0p} вследствие затухания невелико, частоты разрядных токов максимальны, а амплитуды токов $i_{0з}$ существенно меньше амплитуд токов i_{0p} .

В условиях сильного влияния высокочастотных разрядных токов устойчивость, а иногда и надежность функционирования УСЗ, реагирующих на электрические величины переходного процесса, во многом зависит от правильного выбора составляющих, на которые должно реагировать устройство (полный ток переходного процесса $i_0 = i_{0p} + i_{0з}$ или его компоненты), момента фиксации признаков, характеризующих повреждение, частотных характеристик входных элементов, быстродействия и чувствительности измерительных элементов УСЗ.

В разветвленных кабельных сетях, содержащих линии большой протяженности, где токи i_{0p} имеют меньшие частоты, а амплитуды токов i_{03} значительно возрастают и могут превышать амплитуды токов i_{0p} , требования и ограничения в части выбора момента фиксации признаков, быстродействия и чувствительности УСЗ становятся менее жесткими. Учитывая сказанное, исследование влияния процесса разряда поврежденной фазы на значения и соотношения электрических величин переходного процесса, прежде всего в сетях с кабельными линиями малой протяженности, представляет интерес для обоснованного выбора критериев определения поврежденного присоединения и разработки мер, обеспечивающих высокую устойчивость функционирования УСЗ.

Ниже рассматриваются результаты экспериментальных исследований переходных процессов при $K_3^{(1)}$, выполненных на трехфазной физической модели кабельной сети с $U_n = 6$ кВ*.

Модель кабельной сети. Схема рис. 1, а обеспечивала моделирование нескольких кабельных линий общей протяженностью до 1,5—2 км, изменение их числа n , емкостного тока присоединений I_c и сети $I_3^{(1)} = \sum_{i=1}^n I_{ci}$ (от долей до единиц ампер) удаленности l_n точки $K_3^{(1)}$ от шин, переходного сопротивления R_n в месте повреждения, индуктивности источника питания и момента (начальной фазы φ) $K_3^{(1)}$. Моделирование кабельных линий осуществлялось с учетом распределенного характера их параметров в виде цепных схем. Ввиду трудностей достаточно точного учета зависимости сопротивления проводов линий от частоты сопротивления R элементарных звеньев модели (рис. 1, б) выбирались таким образом, чтобы обеспечить затухания разрядных (волновых) переходных процессов в линиях разной протяженности, близкие к реальным (данные по постоянным затухания и волновым параметрам кабельных линий 6—10 кВ взяты из

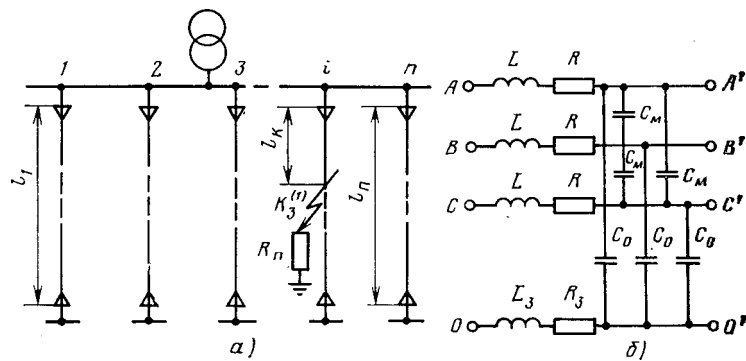


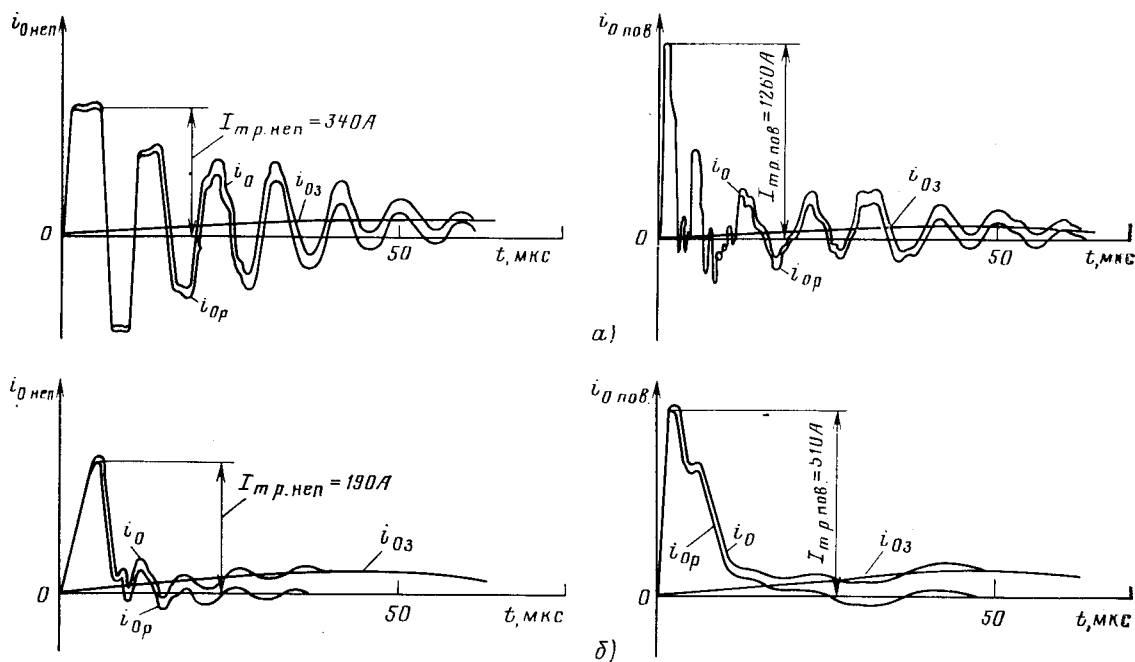
Рис. 1. Схема моделируемой сети (а) и элементарного звена с сосредоточенными параметрами для моделирования кабельных линий (б)

[5] и по результатам экспериментальных исследований в реальных сетях). Принятая длина участка кабельной линии, моделируемого элементарным звеном с сосредоточенными параметрами ($l = 10$ — 20 м), обеспечивала воспроизведение частот разрядных составляющих тока и напряжения нулевой последовательности до единиц мегагерц при погрешностях по амплитуде разрядной волны тока на линиях минимальной протяженности ($l_{\min} = 40$ — 50 м) порядка 10—15 %.

Влияние токов разряда на значения переходных токов. Анализ осциллограмм, полученных на модели, показывает, что при $K_3^{(1)}$ вблизи шин ($l_n \approx 0$) амплитуда разрядных токов i_{0p} как в поврежденном, так и в неповрежденных присоединениях значительно (на самых коротких кабелях с $l = 40$ — 50 м в десятки раз) превышает амплитуду зарядных токов i_{03} (например, рис. 2, а) и остается существенно больше последней даже при достаточно больших удалении точки $K_3^{(1)}$ от шин и переходном сопротивлении в месте повреждения (например, рис. 2, б).

Из рис. 2, а можно видеть, что при $K_3^{(1)}$ вблизи шин форма первых полуволн тока i_{0p} в неповрежденных линиях близка к знакопеременным прямоугольным колебаниям с экспоненциально затухающей амплитудой. Мак-

Рис. 2. Характерные для сети с неактивированными кабельными линиями малой протяженности осциллограммы переходных токов i_0 , i_{0p} , i_{03} в неповрежденной ($l_n = 460$ м) и поврежденной линиях (осциллограммы получены для сети с $I_3^{(1)} = 1$ А, состоящей из 5 линий с $l_n = 460, 200, 165, 100$ и 45 м): а — металлическое $K_3^{(1)}$ вблизи шин при $\varphi = 90^\circ$; б — $K_3^{(1)}$ в конце линии с $l_n = 200$ м через $R_n = 10$ Ом при $\varphi = 90^\circ$



симальных значений амплитуды токов i_{0p} и соответственно полных токов переходного процесса $i_0 = i_{0p} + i_{0з}$ в неповрежденных присоединениях достигают при металлических $K_3^{(1)}$ на шинах. В эти случаях токи i_{0p} неповрежденных присоединений не зависят друг от друга и определяются только волновыми параметрами линий. Амплитуду первой полуволны I_{mp} и частоту f_p разрядных колебаний при замыканиях на шинах с достаточной точностью можно определить по известным соотношениям:

$$I_{mp} = \frac{u(0)}{2z_{л} + z_{0л}}; \quad (1)$$

$$f_p = \frac{v_k}{4l_{л}}, \quad (2)$$

где $u(0)$ — напряжение на поврежденной фазе в момент возникновения $K_3^{(1)}$; $z_{л}$ и $z_{0л}$ — волновые сопротивления каналов фаза—фаза и фаза—земля; $l_{л}$ — длина линии; v_k — скорость распространения электромагнитной волны в канале фаза—земля кабеля.

Если учесть, что для кабельных линий с $U_n = 6$ кВ сечением 25—300 мм² $z_{л} = 23$ —7 Ом, $z_{0л} = 45$ —14 Ом [5], то при $u(0) = U_{мф} = \sqrt{2} U_n$ амплитуда первой полуволны в неповрежденных линиях в сетях с $U_n = 6$ кВ может достигать в соответствии с (1) 170—550 А, а в сетях с $U_n = 10$ кВ ($z_{л} = 28$ —9,8 Ом, $z_{0л} = 57$ —18,5 Ом) 130—390 А, что совпадает с оценками на модели и в реальных

сетях. Частота разрядной составляющей тока i_{0p} в линиях небольшой протяженности в соответствии с (2) может достигать значений от десятков до сотен килогерц. Большие амплитуды и частоты токов i_{0p} , обуславливающие большую крутизну передних фронтов волн di_{0p}/dt , могут вызвать перенапряжения на вторичных обмотках трансформаторов тока нулевой последовательности (ТТНП) и выход из строя элементов УСЗ (например, при осциллографировании начальной стадии переходного процесса при $K_3^{(1)}$ в сети с $U_n = 6$ кВ собственных нужд блока 300 МВт Костромской ГРЭС на вторичных обмотках ТТНП типа ТЗЛМ неповрежденных присоединений были зафиксированы напряжения 1000—1200 В).

В поврежденном присоединении при металлических $K_3^{(1)}$ вблизи шин амплитуда первой полуволны тока i_{0p} примерно равна сумме амплитуд первых полуволн токов i_{0p} неповрежденных присоединений (рис. 3, а) и в зависимости от числа линий, подключенных к шинам, может достигать тысяч ампер. Следует, однако, отметить, что в реальных сетях появление таких больших токов в поврежденном присоединении маловероятно из-за ограничивающего действия сопротивления заземления, влияния индуктивностей ответвления с $K_3^{(1)}$, шин и участков ошиновки до шин, сглаживающих передние фронты волн разрядных токов неповрежденных присоединений, и др.

При близких к шинам $K_3^{(1)}$ разрядный ток i_{0p} определяет не только амплитудные, но и среднеквадратичные значения переходных токов i_0 в присоединениях за время переходного процесса. Например, для сети с параметрами, указанными на рис. 2, отношение среднеквадратичных значений переходного тока i_0 за время переходного процесса, определенных с учетом и без учета составляющих i_{0p} для неповрежденных линий с длинами 460, 200, 165, 100 и 45 м составляет соответственно 4 : 1, 7 : 1, 9 : 1, 11 : 1 и 18 : 1, а для поврежденной линии приблизительно равно 6 : 1. Таким образом, неучет разрядной составляющей при оценке действующего значения тока, например при перемежающемся $K_3^{(1)}$, в ряде случаев может привести к большим погрешностям.

Из сказанного следует также, что подавление высокочастотных разрядных составляющих, применяемое в отдельных исполнениях УСЗ, в сетях с кабельными линиями малой протяженности может привести к существенному уменьшению их чувствительности по току. Поэтому для действия УСЗ желательно использовать полные токи переходного процесса $i_0 = i_{0p} + i_{0з}$, а не отдельные их составляющие, если это не приводит к существенным трудностям в обеспечении помехоустойчивости или надежности устройства.

Влияние токов разряда на соотношения значений (кратности) переходных токов в поврежденном и неповрежденных присоединениях. При близких к шинам $K_3^{(1)}$ отношения амплитуд переходных токов i_0 в поврежденном и неповрежденных присоединениях $I_{мпов} : I_{мпнп}$, используемые в качестве критерия для определения поврежденного присоединения в ряде разработок централизованных УСЗ (ЦУСЗ) [6], определяются практически отношениями амплитуд разрядных составляющих $I_{мр-пов} : I_{мр-нп}$ и существенно больше 1 даже при относительно небольшом числе присоединений n , подключенных к шинам. Следовательно, при близких к шинам

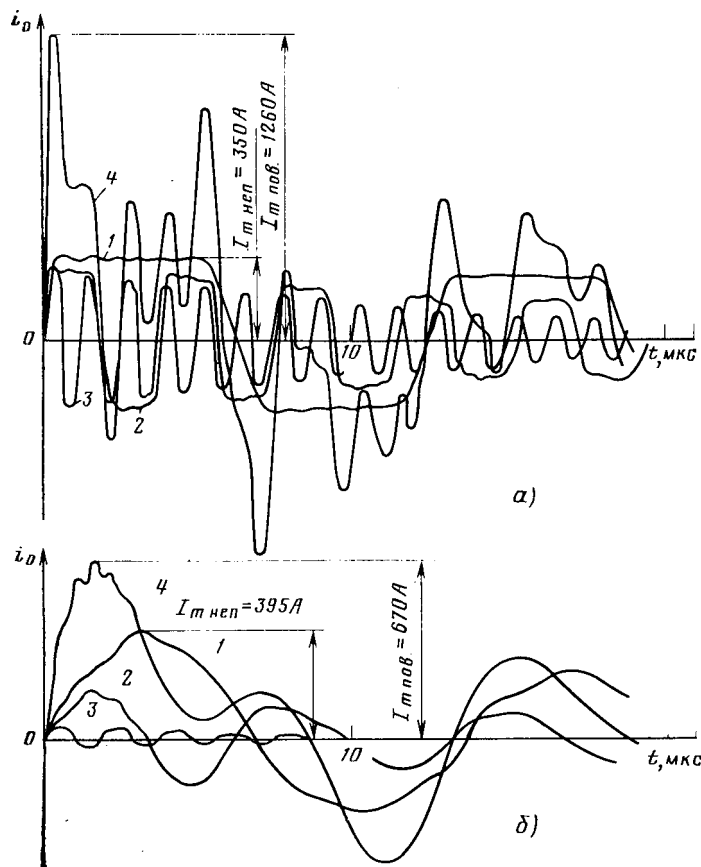


Рис. 3. К объяснению механизма резкого уменьшения соотношений амплитуд полных токов переходного процесса при удалении точки $K_3^{(1)}$ от шин (1, 2, 3 — токи в неповрежденных линиях с $l_{л} = 460, 165$ и 45 м; 4 — ток в поврежденной линии): а — металлическое $K_3^{(1)}$ вблизи шин при $\varphi = 90^\circ$; б — металлическое $K_3^{(1)}$ в конце линии с $l_{л} = 200$ м при $\varphi = 90^\circ$

$K_3^{(1)}$ кратности амплитуд полных токов переходного процесса $I_{мп.пов} : I_{мп.неп}$ благоприятны с точки зрения условий устойчивости функционирования указанных ЦУСЗ. Однако при наличии в месте повреждения переходного сопротивления R_n или при удалении точки $K_3^{(1)}$ от шин кратности амплитуд переходных токов i_0 поврежденного присоединения и отдельных неповрежденных присоединений могут резко уменьшиться. Анализ, проведенный на модели, показал, что под влиянием указанных факторов наиболее существенно уменьшаются кратности амплитуд переходных токов i_0 поврежденного и наиболее протяженных неповрежденных присоединений, которыми, как известно [7], и определяются условия устойчивости функционирования ЦУСЗ, выполненных по данному способу. В качестве примера на рис. 4 приведены полученные по результатам измерений на модели зависимости $I_{мп.пов} : I_{мп.неп} = f(R_n)$ и $I_{мп.пов} : I_{мп.неп} = f(l_k)$ для сети с $I_3^{(1)} = 1$ А для неповрежденных присоединений различной протяженности. При изменении суммарного емкостного тока замыкания на землю сети $I_3^{(1)}$ характер зависимостей существенно не изменяется.

Уменьшение кратностей амплитуд переходных токов под влиянием переходного сопротивления R_n (например, сопротивления дуги) можно объяснить тем, что амплитуды токов разряда i_{0p} и соответственно полных токов переходного процесса i_0 в неповрежденных присоединениях уменьшаются в разной степени из-за различия постоянных затухания составляющих i_{0p} с разными частотами f_p . Более быстро уменьшаются амплитуды переходных токов в наиболее коротких кабельных линиях, где частоты токов i_{0p} максимальны, и в поврежденной линии (где ток i_0 равен сумме токов i_0 неповрежденных линий), в то время как в наиболее протяженных неповрежденных кабельных линиях уменьшение амплитуды тока i_{0p} из-за затухания может быть незначительным. Более сложный характер носит изменение амплитуд токов i_{0p} и соответственно кратностей полных переходных токов $I_{мп.пов} : I_{мп.неп}$ в зависимости от удаленности точки $K_3^{(1)}$ от шин. Из рис. 3, б можно видеть, что удаление точки $K_3^{(1)}$ от шин приводит к сглаживанию фронтов волн разрядных токов i_{0p} в неповрежденных присоединениях. В этих условиях за счет различия частот разрядных токов в неповрежденных линиях амплитуда тока i_{0p} в поврежденной линии уже не будет равна сумме амплитуд токов i_{0p} неповрежденных линий, как это имело место при $K_3^{(1)}$ вблизи шин (рис. 3, а, кривая 4), и резко уменьшится. В то же время в неповрежденной линии относительно большой протяженности (несколько сотен метров и более) амплитуда тока i_{0p} при увеличении l_k может не только не уменьшиться, но даже несколько возрасти по сравнению с ее значением при $K_3^{(1)}$ вблизи шин (рис. 3, а и б, кривые 1). Указанное возрастание объясняется более быстрым затуханием и уменьшением амплитуд в токе i_{0p} протяженной линии составляющих с большими частотами.

Нестабильность кратностей амплитуд полных переходных токов i_0 в поврежденной и неповрежденной линиях, в первую очередь их уменьшение под влиянием указанных причин, могут привести к нарушению устойчивости функционирования ЦУСЗ. Сложный характер зависимостей кратностей амплитуд полных переходных токов i_0 от положения точки $[K_3^{(1)}]$ в сети и значения переходного сопротивления R_n в месте повреждения де-

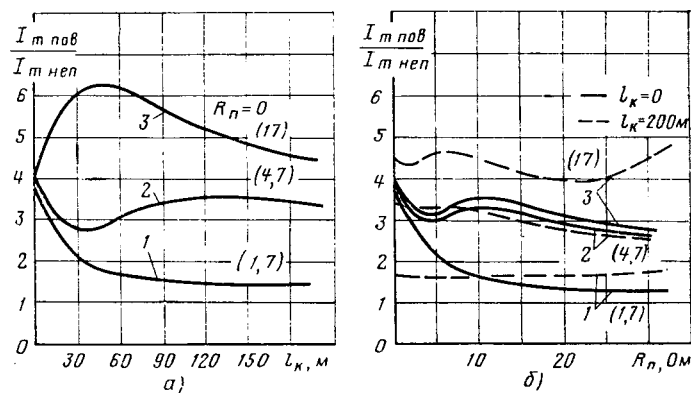


Рис. 4. Изменение соотношений амплитуд переходных токов i_0 в поврежденной и неповрежденных линиях при изменении удаленности l_k точки $K_3^{(1)}$ от шин (а) и значения переходного сопротивления R_n в месте повреждения (б); кривые получены для сети с $I_3^{(1)} = 1$ А: 1, 2, 3 — кратности амплитуд для неповрежденных линий с $l_n = 460, 165$ и 45 м (в скобках над кривыми приведены соотношения амплитуд зарядных токов $I_{мз.пов} : I_{мз.неп}$ для соответствующих линий)

лает практически невозможным расчет их минимальных значений с достаточной точностью и, следовательно, затрудняет оценку возможности применения ЦУСЗ на принципе сравнения амплитуд переходных токов в присоединениях для различных сетей и выбор в необходимых случаях параметров их настройки [7].

Рассмотренные особенности полных токов переходного процесса i_0 создают большие трудности при использовании соотношений их амплитуд в качестве критерия для определения поврежденного присоединения в сетях, содержащих кабельные линии малой протяженности. Следует отметить также, что ЦУСЗ, реагирующие на полные токи переходного процесса, при использовании их в сетях с кабельными линиями малой протяженности должны обладать высоким быстродействием запоминающих элементов и элементов, осуществляющих их блокировку по максимальной амплитуде: время срабатывания $t_{ср.мах}$ указанных элементов не должно превышать длительности полуволны разрядного тока максимальной частоты $T_{р.мах}/2 = 1/f_{р.мах}$ (например, при минимальной длине кабельной линии $l_n = 40-50$ м $f_{р.мах} = 930-750$ кГц и $t_{ср.мах} < 0,5-0,6$ мкс). При меньшем быстродействии запоминающих и блокирующих элементов возможны неправильная фиксация соотношения амплитуд $I_{мп.пов} : I_{мп.неп}$ в сторону их уменьшения по сравнению с действительными значениями и нарушение устойчивости функционирования ЦУСЗ.

Значительно более информативным признаком для определения поврежденного присоединения являются кратности амплитуд зарядных токов $I_{мз.пов} : I_{мз.неп}$. В отличие от токов i_0 и i_{0p} токи заряда в поврежденной и неповрежденных линиях имеют практически одинаковую форму и частоту, а соотношения амплитуд $I_{мз.пов} : I_{мз.неп}$, как показал анализ на модели, остаются практически постоянными при изменении в широких пределах частоты тока $i_{0з}$ (от 200 до 5000 Гц), удаленности точки $K_3^{(1)}$ от шин и значения переходного сопротивления R_n в месте повреждения. Распределение зарядных токов в неповрежденных линиях в диапазоне частот $f_3 = 200 \div 5000$ Гц практически определяется только емкостями фаз линий на землю.

Учитывая сказанное, можно полагать, что использование для действия ЦУСЗ, сравнивающих амплитуды пе-

переходных токов в присоединениях, составляющих i_{03} вместо полных токов переходного процесса $i_0 = i_{0p} + i_{03}$ может существенно расширить область их устойчивой работы, прежде всего в кабельных сетях, содержащих линии малой протяженности, и тем самым расширить область их возможного применения. Отстройка от составляющих i_{0p} в указанных сетях, где различие между частотами токов i_{0p} и i_{03} достаточно велико, не представляет трудностей.

Влияние процесса разряда поврежденной фазы на фазовые соотношения электрических величин переходного процесса. Из приведенных на рис 2 и 3 осциллограмм можно видеть, что фазовые соотношения переходных токов i_0 в поврежденной и неповрежденных линиях в начальной стадии переходного процесса определяются практически только токами разряда i_{0p} . Из этого следует, что направленные УСЗ, реагирующие на полные токи переходного процесса i_0 , должны осуществлять фиксацию знаков тока или мощности в начальной стадии переходного процесса, определяемой длительностью первых полувольт токов разряда, и обладать соответствующим быстродействием $t_{ср\max} < 1/2 f_{p\max}$. При меньшем быстродействии УСЗ должны быть надежно отстроены от влияния составляющих с частотами $f_p > 1/2 t_{ср\max}$, способных исказить фазовые соотношения в интервале времени срабатывания устройства.

В напряжении нулевой последовательности u_0 разрядные колебания выражения слабее, чем в токах i_0 : амплитуды их даже при близких к шинам $K_3^{(1)}$ и $R_n = 0$ не превышают амплитуд зарядных колебаний. Наличие разрядных колебаний u_{0p} обуславливает быстрое (при близких к шинам $K_3^{(1)}$ практически скачкообразное) возрастание напряжения u_0 на переднем фронте (рис. 5, а). При отсутствии смещения нейтрали в момент возникновения $K_3^{(1)}$ ($u_{см}(0) = 0$) разрядные колебания не вызывают изменения полярности напряжения u_0 на переднем фронте (рис. 5, а, б, в, кривые 1), и моменты переходов через нулевые значения кривой напряжения $u_0(t)$ определяются только частотой зарядных колебаний и сети

$f_c = 50$ Гц. В этих условиях напряжение u_0 даже при возникновении $K_3^{(1)}$ на спаде кривой фазного напряжения при близких к нулю углах пробоя $\varphi = 5-7^\circ$ (вероятностью возникновения $K_3^{(1)}$ при меньших углах практически можно пренебречь [4]) и максимальных частотах зарядных колебаний сохраняет свой первоначальный знак не менее, чем десятки микросекунд. Однако даже небольшое смещение нейтрали $u_{см}(0)$ в несколько процентов $U_{тф}$ (возникающее, например, за счет несимметрии емкостей фаз на землю), совпадающее по знаку с напряжением $u(0)$ на поврежденной фазе в момент возникновения $K_3^{(1)}$, может существенно изменить характер переходного процесса по напряжению u_0 в начальной стадии и исказить начальные фазовые соотношения между напряжением u_0 и переходными токами в присоединениях. Из приведенных на рис. 5 осциллограмм можно видеть, что при $u_{см}(0) \neq 0$ (кривые 2) моменты переходов через нулевые значения кривой напряжения $u_0(t)$ в начальной стадии переходного процесса определяются разрядными колебаниями, при этом полярность первой полувольты напряжения $u_0(t)$, определяемая полярностью напряжения $u_{см}(0)$, не совпадает с полярностью первой полувольты тока i_0 в поврежденной линии.

В условиях возможных искажений начальных фазовых соотношений между напряжением u_0 и токами i_0 в направленных УСЗ должны быть приняты меры, обеспечивающие правильную фиксацию начального знака напряжения u_0 или мощности $p_0 = u_0 i_0$.

Выводы. 1. Токи разряда поврежденной фазы при $K_3^{(1)}$ могут оказывать существенное влияние на значения (амплитудные и интегральные), соотношения значений и фазовые соотношения полных токов переходного процесса в присоединениях, прежде всего в кабельных сетях, содержащих линии малой протяженности, определяя тем самым условия устойчивости и надежности функционирования и требования к быстродействию УСЗ, реагирующих на полные токи переходного процесса.

2. С целью обеспечения наибольшей чувствительности по первичному току для действия УСЗ, основанных на использовании переходных процессов, желательно использовать полные токи переходного процесса, а не отдельные составляющие, если это не приводит к существенным трудностям в обеспечении устойчивости или надежности их функционирования.

3. В кабельных сетях, содержащих линии малой протяженности, УСЗ, реагирующие на полные токи переходного процесса, должны обладать быстродействием измерительных и фиксирующих элементов, не превышающим доли микросекунды.

4. Нестабильность соотношений амплитуд полных токов переходного процесса при изменениях удаленности точки $K_3^{(1)}$ от шин и величины переходного сопротивления в месте повреждения, высокие требования к быстродействию измерительных и фиксирующих элементов, сложность выбора оптимальных параметров настройки согласующих элементов в кабельных сетях с линиями малой протяженности создают большие трудности в обеспечении устойчивости функционирования централизованных УСЗ, сравнивающих амплитуды полных переходных токов в присоединениях. С целью повышения устойчивости функционирования и расширения области применения указанных УСЗ, упрощения выбора параметров настройки согласующих элементов целесообразно использовать для их действия не полные токи переходного про-

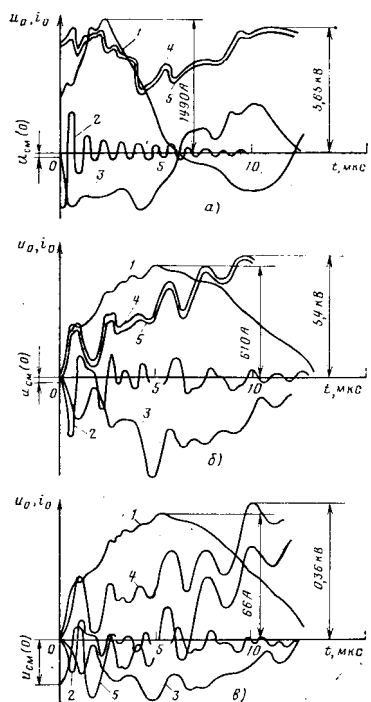


Рис. 5. Осциллограммы переходных токов i_0 в поврежденной линии (кривая 1) и неповрежденных линиях (кривые 2 и 3 для линий с $l_d = 45$ и 460 м) и напряжения u_0 (кривые 4 и 5 при $u_{см}(0) = 0$ и $u_{см}(0) = 0,025 U_{тф}$): а — металлическое $K_3^{(1)}$ вблизи шин при $\varphi = 90^\circ$; б, в — металлическое $K_3^{(1)}$ в конце линии с $l_d = 165$ м при $\varphi = 90^\circ$ и $\varphi = 175^\circ$

цесса, а среднечастотные зарядные составляющие, если при этом обеспечивается требуемая чувствительность по первичному току.

5. Направленные УСЗ, реагирующие на полные токи, должны фиксировать фазовые соотношения в начальной стадии переходного процесса определяемой длительностью полуволн разрядных токов, и обладать для этого соответствующим быстродействием измерительных и фиксирующих элементов. При быстродействии, меньшем требуемого, УСЗ должны быть надежно отстроены от влияния составляющих с частотами, способными исказить фазовые соотношения электрических величин переходного процесса в интервале времени срабатывания.

6. В напряжении нулевой последовательности u_0 разрядные колебания выражены слабее, чем в токах переходного процесса, и при отсутствии смещения нейтрали в момент возникновения $K_3^{(1)}$ моменты переходов через нулевые значения кривой напряжения $u_0(t)$ определяются частотой зарядных колебаний и сети. При наличии смещения нейтрали в момент возникновения $K_3^{(1)}$ возможно искажение начального знака напряжения u_0 и появление на переднем фронте кривой $u_0(t)$ знакопеременных колебаний с частотой, определяемой частотой разряда емкости поврежденной фазы сети. В направлен-

ных УСЗ должны быть приняты меры, обеспечивающие правильную фиксацию начального знака напряжения u_0 или мощности p_0 в указанных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов И. Н. О принципах выполнения защиты от замыканий на землю, основанной на использовании переходных процессов. — Электричество, 1962, № 2.
2. Сирота И. М. Переходные процессы в компенсированной сети при замыкании фазы на землю. — В кн.: Вопросы устойчивости и автоматики энергосистем. — Киев: Изд. АН УССР, 1959, вып. 16.
3. Сирота И. М., Масляник В. В. — Свободные емкостные токи замыкания на землю в электрических сетях с малыми токами замыкания на землю — Электричество, 1977, № 3.
4. Дударев Л. Е., Зубков В. В. — Некоторые особенности переходных процессов при замыкании фазы на землю в сетях 6—35 кВ и использование их для средств релейной защиты. — Электрические станции, 1978, № 6.
5. Шалыт Г. М. — Определение мест повреждения линий электропередачи импульсными методами. — М.: Энергия, 1968.
6. Лебедев О. В., Шунин В. А. — О защите от замыканий на землю компенсированных кабельных сетей 6—10 кВ с использованием принципа сравнения амплитуд переходных токов. — Электричество, 1973, № 12.
7. Лебедев О. В., Шунин В. А. — Параметры настройки устройств сигнализации, сравнивающих токи в присоединениях. — Электричество, 1980, № 2.

[18.02.82]



УДК 621.315.1.027.3.001.4

Советско-американские исследования однофазного АПВ в электропередачах 750—765 кВ с четырехлучевыми реакторами

БЕЛЯКОВ Н. Н., РАШКЕС В. С., ХОЕЦИАН К. В., (ВНИИЭ, СССР), ШЕРЕР Г. Н.,
ШПЕРЛИНГ Б. Р. (АЭП, США), ЧЕДВИК ДЖ. У. (ТВА, США)

Проведенные в СССР испытания [1] показали, что в линиях 750 кВ длиной свыше 400 км, снабженных шунтирующими реакторами, времена гашения дуги подпитки при ОАПВ достигают 1,5—2,5 с. Из-за более высокой промышленной частоты (60 Гц) на ВЛ 765 кВ США большие времена гашения требуются при еще меньших длинах. Для ускорения гашения дуги подпитки и сокращения бестоковых пауз ОАПВ целесообразно использовать компенсационные реакторы, включаемые в нейтрали групп шунтирующих реакторов 750 кВ и уменьшающие установившийся ток подпитки I_n , установившееся на отключенной фазе после гашения дуги напряжение U_n и скорость восстановления этого напряжения v [2—4]. Первый опыт использования таких четырехлучевых реакторов (ЧЛР) в линии 500 кВ дал обнадеживающие результаты [5].

В советских транспонированных линиях 750 кВ с одинаковыми по фазам параметрами возможно прямое использование схемы ЧЛР; для американских нетранспонированных линий 765 кВ потребовалось дополнить обычный ЧЛР второй, коммутируемой схемой, описанной в [6].

Учитывая заинтересованность обеих стран в сокращении бестоковых пауз ОАПВ на линиях 750—765 кВ, испытания ОАПВ с применением ЧЛР были включены в программу советско-американского научно-технического сотрудничества в области электропередач сверхвысокого напряжения и осуществлены в 1979 г. на электропередаче 750 кВ Днепр — Винница длиной 417 км и электропередаче 765 кВ Каммер — Меррисвилл длиной 243 км.

Характеристики электропередачи и методики испытаний. Схемы электропередач 750—765 кВ во время испытаний представлены на рис. 1. Погонные параметры нетранспонированной линии США при 60 Гц:

$$\begin{aligned} z_{AA} = z_{CC} &= 0,113 + j0,561 \text{ Ом/км}; z_{BB} = 0,155 + j0,557 \text{ Ом/км}; \\ z_{AB} = z_{BC} &= 0,098 + j0,238 \text{ Ом/км}; z_{AC} = 0,096 + j0,187 \text{ Ом/км}; \\ y_{AA} = y_{CC} &= j4,39 \cdot 10^{-6} / (\text{Ом} \cdot \text{км}); y_{BB} = j4,51 \cdot 10^{-6} / (\text{Ом} \cdot \text{км}); \\ y_{AB} = y_{BC} &= j0,72 \cdot 10^{-6} / (\text{Ом} \cdot \text{км}); y_{AC} = j0,19 \cdot 10^{-6} / (\text{Ом} \cdot \text{км}). \end{aligned}$$

Погонные параметры транспонированной линии 750 кВ СССР при 50 Гц:

$$\begin{aligned} z_1 &= 0,02 + j0,286 \text{ Ом/км}; z_0 = 0,17 + j0,62 \text{ Ом/км}; \\ y_1 &= j4,15 \cdot 10^{-6} / (\text{Ом} \cdot \text{км}); y_0 = j3,15 \cdot 10^{-6} / (\text{Ом} \cdot \text{км}). \end{aligned}$$

Нестандартными элементами схем ЧЛР являются компенсационные реакторы КР и защищающие их от перенапряжений аппараты (ОП и ИП). Компенсационные реакторы США не имеют стального сердечника и выполнены на каркасе из стеклотеплоизолятора. Обмотка реакторов снабжена отпайками (рис. 1). Эти реакторы рассчитаны на длительный ток 20 А и двухсекундный ток 250 А. Советские компенсационные реакторы выполнены на стальном сердечнике с воздушным зазором и помещены в бак с маслом; обмотка также имеет отпайки. Эти реакторы рассчитаны на длительный ток 15 А, трехсекундный ток 200 А и ток динамической устойчивости 800 А.

Уровни изоляции компенсационных реакторов выбраны в соответствии с уровнями изоляции нейтральных выводов шунтирующих реакторов 750—765 кВ. Испытательное напряжение промышленной частоты (действующее значение) этих выводов равно: у реактора 765 кВ Р1—65 кВ в течение 0,5 с; у реактора 765 кВ Р2—

130 кВ в течение 1 мин; у реакторов 750 кВ $P3 - P5 - 85$ кВ в течение 1 мин.

Исходя из испытательного напряжения могут быть установлены допустимые для изоляции нейтральных выводов воздействия коммутационных перенапряжений и временных перенапряжений. В частности, для советских реакторов 750 кВ допустимая амплитуда коммутационного перенапряжения равна 145 кВ, а временного перенапряжения продолжительностью до 1 с — 86 кВ. Временные перенапряжения возникают при ОАПВ на стадии горения дуги замыкания и подпитки и после гашения дуги подпитки; их величина должна быть ограничена до безопасного уровня надлежащим выбором индуктивности компенсационного реактора (у советских реакторов — не более 310 Ом). Коммутационные перенапряжения на стадии возникновения и гашения дуги в этом случае безопасны для изоляции, но могут превысить допустимый уровень при плановых включениях линии или при переключениях выключателей $B3-B6$. Эти перенапряжения ограничиваются до безопасного уровня защитными аппаратами.

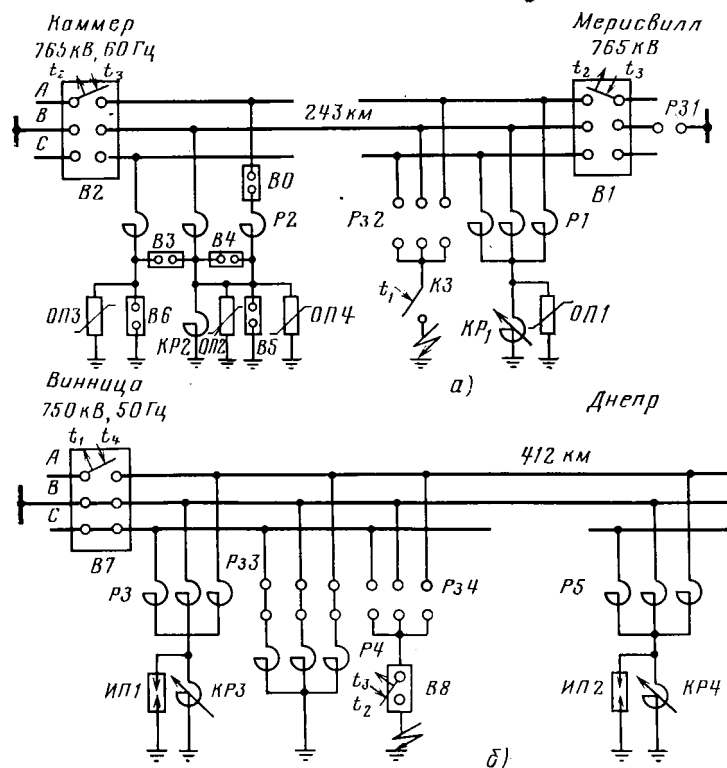


Рис. 1. Схемы электропередач 750—765 кВ с ЧЛР при испытаниях ОАПВ: а — в США; $P1, P2$ — группы шунтирующих реакторов 765 кВ, 300 Мвар; $B1, B2$ — воздушные выключатели 765 кВ; $B0$ — выключатель нагрузочного тока реактора 765 кВ с резистором 7 кОм двухстороннего действия, вводимым при включении на 4—8 мс, при отключении — на 16 мс; $KP1$ — компенсационный реактор 300 Ом (отпайка 150 Ом); $KP2$ — то же, 800 Ом (отпайки 200, 400 и 600 Ом); $B3-B6$ — вакуумные выключатели коммутируемой схемы ЧЛР; $ОП1$ — цинк-оксидный ограничитель перенапряжений на 85 кВ; $ОП2-ОП4$ — то же на 185 кВ; $P31, P32$ — разъединители 765 кВ; $K3$ — устройство для создания дугowego к. з.; в 24 опытах $P31$ был разомкнут и $B1$ не коммутировался, в трех опытах $P31$ был замкнут и $B1$ коммутировался; б — в СССР: $P3 - P5$ — группы шунтирующих реакторов 787 кВ; 330 Мвар; $B7, B8$ — воздушные выключатели 750 кВ; $KP3, KP4$ — компенсационные реакторы 310 Ом (отпайки 220, 235, 255 и 275 Ом); $ИП1, ИП2$ — стабилизированные защитные искровые промежутки на 130—140 кВ; $P33, P34$ — разъединители 750 кВ; в 8 опытах $P33$ был включен, в 7 опытах отключен

В передаче 765 кВ с этой целью установлены сверхнелинейные ограничители перенапряжений с уровнем ограничения 85 кВ ($ОП1$) и 185 кВ ($ОП2-ОП4$). Ограничитель $ОП1$ выполнен на четырех параллельных колонках дисков и способен пропустить ток 130 А в течение 12 периодов. Ограничитель $ОП2$ выполнен на двух колонках, ограничители $ОП3, ОП4$ — на шести колонках и рассчитаны на ток 375 А в течение 5 периодов. В передаче 750 кВ ограничение перенапряжений обеспечивалось стабилизированными искровыми промежутками $ИП1, ИП2$, набранными из стандартных искровых промежутков вентильных разрядников 330—500 кВ на пробивное напряжение 130—140 кВ. После срабатывания искровой промежутков не гарантирует самостоятельного гашения тока из-за большой скорости восстановления напряжения, и протекание в нем тока может продолжаться до восстановления симметричного режима линии. Выбранные промежутки способны пропускать ток 250 А в течение нескольких секунд.

В части опытов искровой промежутков $ИП1$ был заменен обычными вентильными разрядниками 35 кВ с пробивным напряжением 106—130 кВ.

Дуговое замыкание создавалось на одностороннее включенной под рабочее напряжение линии (в трех опытах — в режиме транзита мощности). При одностороннем включении, упрощающем выполнение опытов, в установившемся токе подпитки присутствует только электростатическая составляющая; однако влияние отсутствующей электромагнитной составляющей можно приближенно воспроизвести, специально ухудшив компенсацию междофазных емкостей линии компенсационными реакторами, что соответственно увеличит электростатическую составляющую тока. Например, для испытывавшейся передачи 750 кВ с двумя шунтирующими и двумя компенсационными реакторами по 250 Ом установившийся ток подпитки при передаче мощности 1500 МВт должен составить 31 А. Если при одностороннем включении линии оставить на ней только один компенсационный реактор, ток подпитки составит около 37 А.

В опытах на линии 765 кВ замыкание создавалось падающим ножом, вводимым в воздушный промежуток длиной 4,2 м стальную проволоку диаметром 0,8 мм (рис. 2); в опытах на линии 750 кВ поддерживающая гирлянда 750 кВ длиной 6,1 м, шунтированная алюминиевой проволокой диаметром 0,5 мм, подключалась к линии выключателем 750 кВ. Скорость смыкания контактов выключателя велика; это позволяло осуществить замыкание в любой фазный угол питающего напряжения, в том числе вблизи нуля, когда аperiodическая составляющая в переходном токе подпитки максимальна [1]. Скорость падающего ножа много меньше (2 м/с), и фазные углы в момент возникновения замыкания лежали в диапазоне 35—105°. В этом случае аperiodическая составляющая меньше, что способствует более быстрому гашению дуги.

Последовательность коммутаций в опытах показана на рис. 1 обозначениями t_1-t_4 . На линии 765 кВ она соответствовала осуществляемой при эксплуатационном ОАПВ; продолжительность короткого замыкания (к. з.) составила примерно 0,04 с, а амплитуда тока к. з. — 4,1—17,5 кА. Бестоковая пауза ОАПВ по эксплуатационным соображениям была ограничена до 0,5 с, что в опытах с большим током подпитки должно было привести к неуспешному ОАПВ. В опытах на линии 750 кВ был использован способ моделирования ОАПВ по [1], исключая стадию к. з., что удобно для энергосисте-

мы. Начальный дуговой канал создавался здесь переходным током подпитки, амплитуда которого составляла 1—3,4 кА. Из [7] известно, что амплитуда и продолжительность тока к. з. практически не влияют на время гашения тока подпитки. Времена гашения, полученные при использовании обеих рассматриваемых последовательностей коммутаций в предшествующих испытаниях на советских линиях 750 кВ [11], оказались, действительно, достаточно близкими.

Для исключения к. з. при повторном включении, если пауза ОАПВ окажется меньше реального времени гашения дуги, в испытаниях на линии 750 кВ место замыкания отсекалось выключателем ранее повторного включения линии.

Напряжение на питающих шинах перед опытом в американской части испытаний отклонялось от номинального (765 кВ) не более чем на 2 %; в советской части испытаний это напряжение составляло 0,94—1 наибольшего рабочего (787 кВ). Скорость ветра в большинстве опытов лежала в диапазоне от 0 до 5 м/с и лишь в нескольких опытах приближалась к 9—10 м/с.

Для измерения напряжений были использованы емкостные делители напряжения, собранные на ПИН вводов реакторов и на экранированных обкладках трансформаторов тока 750—765 кВ, для измерения токов — трансформаторы тока и малоиндуктивные токоизмерительные шунты.

В американской части испытаний для регистрации напряжений и токов была применена высокоточная измерительная система с преобразованием входных аналоговых электрических сигналов в частотно модулированные световые сигналы, передачей их по световодам, обратным преобразованием в электрические сигналы и записью их на магнитограф [8]. Такая система нечувствительна к помехам, вызванным электромагнитными наводками и скачками потенциала на заземляющем контуре. Для защиты от перегрузки цепей измерения тока подпитки и восстанавливающегося напряжения были применены электронные ограничители. В советской части испытаний для регистрации напряжений и токов, измеряемых шунтами, были применены электронные осциллографы с механической разверткой; для регистрации токов, измеряемых трансформаторами тока, — магнитоэлектрические осциллографы. Ток подпитки регистрировался установленным в открытом распределительном устройстве 750 кВ вблизи точки замыкания магнитоэлектрическим осциллографом, который для защиты от скачков потенциала на заземляющем контуре был изолирован от земли, в том числе по цепям питания. Запуск измерительной аппаратуры и управление коммутационным оборудованием на линии 765 кВ осуществлялись ЭВМ, на линии 750 кВ — специальным электронно-релейным блоком. Передача управляющего сигнала на удаленный конец электропередачи осуществлялась на ВЛ 765 кВ по радиорелейной линии, на ВЛ 750 кВ — по высокочастотному каналу связи по проводам линии.

Результаты испытаний. Для выявления зависимости времени гашения дуги подпитки от установившихся значений I_n и U_n в испытаниях варьировалось количество шунтирующих и компенсационных реакторов и реактивное сопротивление компенсационных реакторов. На линии 765 кВ выполнено 27 опытов в восьми схемах, для которых согласно расчету амплитуда I_n изменялась от 11 до 113 А, а амплитуда U_n — от 0,08 до 1,5 отн. ед. На линии 750 кВ выполнено 15 опытов в пяти схемах,

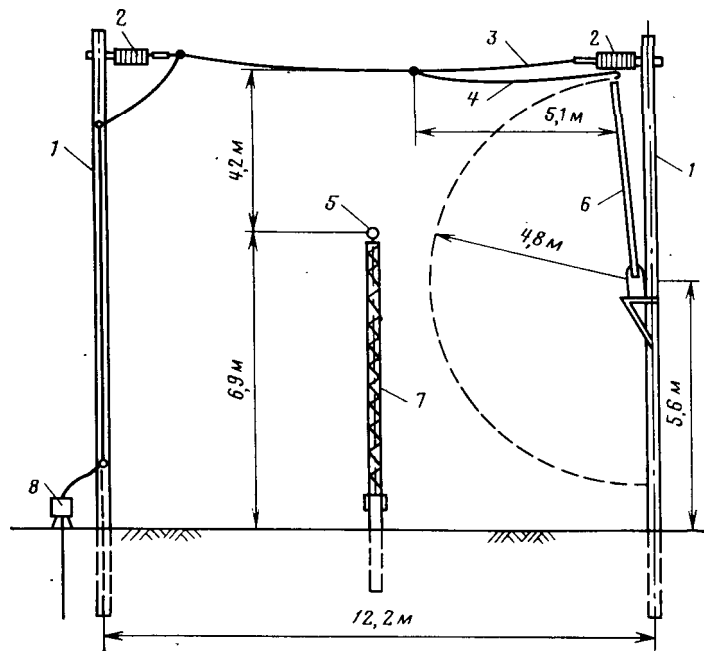


Рис. 2. Устройство для создания дугового к. з. на линии 765 кВ: 1 — деревянная стойка; 2 — гирлянда изоляторов; 3 — заземляющий провод; 4 — расплавляемая стальная проволока; 5 — находящаяся под рабочим напряжением шина 765 кВ; 6 — падающий нож из стекловолка; 7 — опорная колонка изоляторов; 8 — трансформатор тока

в которых по расчету $I_n = 4—69$ А, а $U_n = 0,07—3$ отн. ед. Указанные здесь наивысшие значения U_n определены расчетом в линейной схеме и не учитывают их снижения под действием нелинейных факторов.

Результаты опытов суммированы в таблице, а характерные осциллограммы представлены на рис. 3 и 4.

Составляющая промышленной частоты в токе подпитки может быть определена, если достигнуто квазиустановившееся состояние дуги. Нелинейное сопротивление дуги порождает в токе высшие гармоники, особенно третья, содержание которой близко к 40 %. Приблизительно вычисленные из осциллограмм значения составляющей промышленной частоты хорошо согласовались с расчетными значениями I_n .

В схемах, далеких от резонанса, восстановление напряжения после гашения дуги происходит в форме медленно затухающих биений (рис. 3 и 4). Установившийся режим по напряжению на отключенной фазе за бестоковую паузу ОАПВ 0,5—1,5 с не достигается, и величина установившегося напряжения может быть оценена как полусумма максимума и минимума биений вблизи момента повторного включения. К этому моменту биения заметно затухают, разница между максимумом и минимумом биений уменьшается, и точность оценки повышается. Опытные значения установившегося напряжения в таких схемах хорошо согласовывались с расчетными оценками U_n . В резонансных схемах восстановление напряжения на отключенной фазе происходило без биений — в форме плавного нарастания напряжения до установившегося значения, которое было существенно ниже рассчитанного без учета потерь на корону: в схеме с тремя шунтирующими и одним компенсационным реакторами на линии 750 кВ — 1,12—1,18 отн. ед. при расчетном значении 1,45 отн. ед.; в схеме с тремя шунтирующими реакторами без компенсационных — 1,18—

Линия	Количество шунтирующих реакторов	Количество компенсационных реакторов	Реактивное сопротивление компенсационных реакторов, Ом		Расчетные значения		Напряжение, достигнутое в биениях после гашения, отн. ед.	Количество опытов	Время гашения дуги подпитки t , гаш. с	Примечания
			КР1 или КР3	КР2 или КР4	$I_{п}$, А	$U_{д}$, отн. ед.				
765 кВ 60 Гц 243 км	2	0	—	—	113*	1,50	—	1	>0,5***	КР2 был частично закорочен из-за повреждения
		1	—	400	72*	0,74	—	2	>0,5***	
		1	—	400	56**	0,69	0,95	1	0,041	
		1	—	800	35**	0,33	0,64	1	0	
		1	300	—	37—42**	0,3—0,5	0,5	1	0,026	
		2	150	200	63**	0,77	—	1	>0,5***	
		2	150	400	52*	0,45	0,70—0,73	3	0,051; 0,063; 0,16	
		2	150	400	42**	0,42	0,55—0,57	2	0,038; 0,04	
	3	2	300	400	39*	0,30	0,45	1	0,022	оптимальная компенсация
		2	300	400	34**	0,30	0,39—0,45	5	0,011; 0,013; 0,023; 0,016; 0,034	
		2	150	800	33*	0,24	0,38—0,43	2	0,019; 0,024	
		2	150	800	17—20**	0,14	0,16—0,22	3	0,012; 0,018; 0,034	
		2	300	800	11**	0,05—0,08	0,1—0,15	4	0; 0,016; 0,018; 0,042	
		0	—	—	70	>3	1,18—1,24****	5	0,33; 0,51; 0,53; 0,68; 1,42	
		1	—	235 или 255	37	1,45	1,12—1,18****	3	0,09; 0,22; 0,3	
		0	—	—	70	0,20	0,37—0,43	2	0,36; 0,67	
750 кВ 50 Гц 417 км	2	1	—	235	37	0,14	0,18—0,23	3	0,22; 0,24; 0,24	оптимальная компенсация
		2	235	235	4	0,07	0,08	2	0,14; 0,16	
		2	235	235	4	0,07	0,08	2	0,14; 0,16	

* — замыкание на средней фазе нетранспонированной линии; ** — то же на крайней фазе; *** — за указанное время дуга подпитки не погасла; **** — напряжение, демпфированное коронкой, плавно нарастает до установившегося значения.

1,24 отн. ед. при расчетном значении более 3 отн. ед. При однофазном включении той же линии с тремя шунтирующими и одним компенсационным реакторами установившееся резонансное напряжение на невключенных фазах оказалось ограниченным до 1,18—1,27 отн. ед. Эти значения близки к предшествующим расчетным оценкам [9], по которым для линии 750 кВ со сходными параметрами ожидалось ограничение резонансных перенапряжений до 1,15—1,2 отн. ед.

Составляющие переходного тока подпитки рассмотрены в [1]. Наибольшее влияние на время гашения дуги оказывает аperiodическая составляющая, время затухания которой, определяемое параметрами линии, реакторов и дуги, при возникновении замыкания вблизи нуля напряжения может достигать 0,3 с. Гашение дуги обеспечивалось восстановлением диэлектрической прочности после одной или нескольких попыток обрыва тока (рис. 3 и 4). Попытки гашения не наблюдались до того, как переходный ток подпитки начинает переходить через нуль, и окончательное гашение не наступало ранее затухания аperiodической компоненты. В схемах с компенсационными реакторами и малым установившимся током подпитки гашение дуги происходило сразу после затухания аperiodической компоненты переходного тока (рис. 3, б, 4), обычно при первой же попытке обрыва тока. Это подчеркивает особенно неустойчивый характер дуги подпитки при применении компенсационных реакторов, когда обеспечиваются малый установившийся ток подпитки и малое восстанавливающееся напряжение.

При отсутствии аperiodической компоненты переходы тока подпитки через нуль происходят, начиная с момента отключения к. з. В этом случае немедленному гашению тока подпитки в течение некоторого времени может препятствовать тепловая инерция дугового стол-

ба к. з., вследствие которой сохраняется его высокая проводимость. Однако, как показали испытания на линии 765 кВ (см. таблицу), в этих случаях при использовании компенсационных реакторов окончательное гашение дуги подпитки часто происходило сразу после отключения к. з. либо на 0,01—0,03 с позднее. Аналогичные случаи гашения отмечены в [1].

Осциллограммы повторных пробоев в дуговом промежутке 4,2 м, использованном на линии 765 кВ, позволили оценить скорость нарастания его электрической прочности. Среднее выдерживаемое промежутокм напряжение, по крайней мере, в течение первых 50 мс после гашения, оценено выражением $U = 10 t$, где U выражено в киловольтах, а t — в миллисекундах. В опытах на советских линиях 750 кВ с дуговым промежутком около 6 м отмечен значительный разброс в значениях выдерживаемого промежутокм напряжения; для среднего выдерживаемого напряжения получено более осторожное значение $U = 7,5 t$, и установлено, что полная прочность на уровне 2—2,1 отн. ед. восстанавливается за 0,15—0,2 с [1]. В опытах на линии 750 кВ с тремя шунтирующими реакторами, где $U_{д}$ достигает 1,2—1,25 отн. ед., средняя скорость нарастания восстанавливающегося напряжения составила 5,3 кВ/мс, что способствовало более длительному горению дуги.

Зарегистрированные времена гашения дуги подпитки представлены на рис. 5 в зависимости от $I_{п}$ и $U_{д}$. Большой разброс времен гашения при неизменных $I_{п}$ и $U_{д}$ является естественным для дуг подпитки (по [10] наибольшее время горения подпитки может превысить наименьшее время в 40—100 раз), поэтому выбор бестоковой паузы ОАПВ следует основывать на возможно большем экспериментальном материале. С этой целью на рис. 5 дополнительно нанесены верхние огибающие времен га-

шения, полученных в опытах на советских линиях 750 кВ без компенсационных реакторов [1]. Как следует из рис. 5, опытные точки рассматриваемых совместных испытаний хорошо согласуются с данными [1]. Такое же хорошее соответствие данным настоящей статьи и [1] получено в последующих опытах на линии 750 кВ длиной 525 км, снабженной ЧЛР [11]. Из всех полученных экспериментальных данных можно заключить, что, ограничив ЧЛР амплитуду устанавившегося тока подпитки

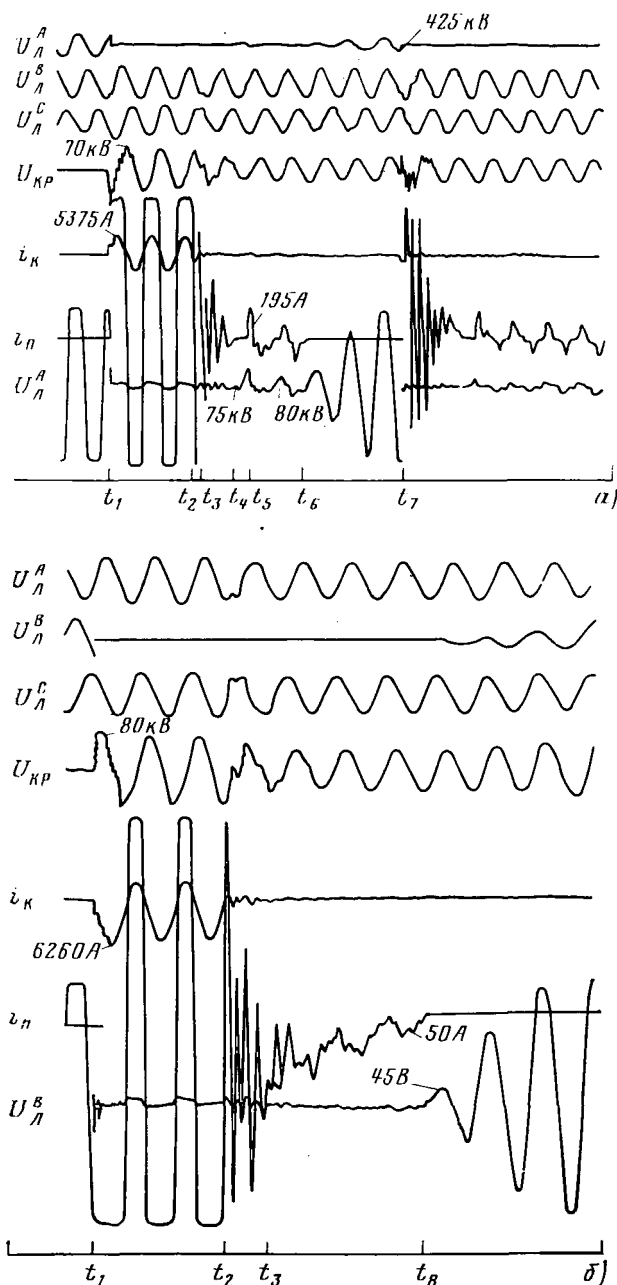


Рис. 3. Характерные осциллограммы гашения дуги подпитки в опытах на линии 765 кВ: а — горение дуги при большом токе ($I_n = 62$ А) с неуспешными попытками гашения (дуга не погасла за 0,5 с); б — быстрое гашение при уменьшенном токе ($I_n = 52$ А); u_A, u_B, u_C — напряжения фаз А, В, С линии; u_{KP} — напряжение на компенсационном реакторе; i_K — ток к. з., i_n — ток подпитки; t_1 — возникновение к. з., t_2 — его отключение; t_3 — ввод в работу коммутируемой схемы ЧЛР в соответствии с поврежденной фазой (а — отключение выключателей В5 и В3; б — отключение выключателей В5 и В6); t_4, t_8 — попытки гашения дуги; t_5, t_7 — повторные пробы промежуток; t_8 — окончательное гашение

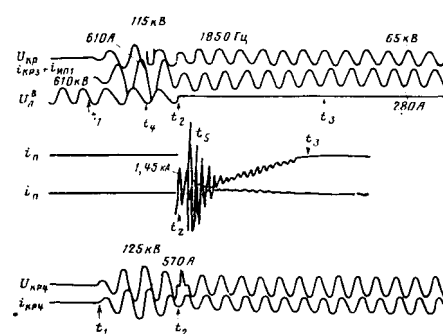


Рис. 4. Характерная осциллограмма гашения дуги подпитки в опыте на линии 750 кВ ($I_n = 4$ А); ИП1 заменен разрядником 35 кВ: u_B — напряжение фазы В линии; i_n — ток подпитки; u_{KP3}, u_{KP4} — напряжения на компенсационных реакторах КР3, КР4; i_{KP3} — ток в КР3; i_{KP4} — ток в ИП1; t_1 — отключение фазы линии; t_2 — создание на ней дугового замыкания; t_3 — гашение дуги; t_4 — пробой разрядника 35 кВ; t_5 — гашение дуги в нем

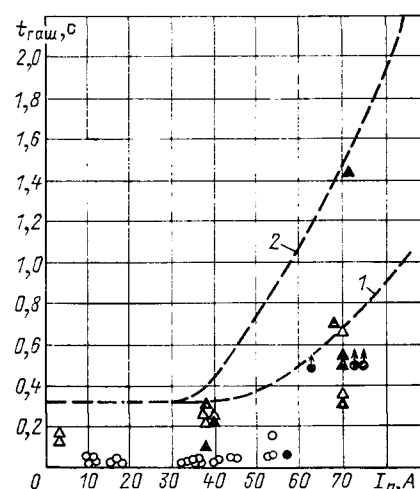


Рис. 5. Время гашения дуги подпитки $t_{гаш}$ в зависимости от амплитуд установившегося тока подпитки I_n и напряжения на отключенной фазе U_n .

○, ● — опыты на линии 765 кВ при $U_n = 0,05—0,46$ и $0,69—0,74$ отн. ед. соответственно (↑ — дуга за это время не погасла); △, ▲ — опыты на линии 750 кВ при $U_n = 0,07—0,2$ и $1,12—1,24$ отн. ед. соответственно; 1 и 2 — наибольшее время гашения при $U_n < 0,5$ и $U_n \geq 0,5$ отн. ед. соответственно по [1]

до 30—45 А, можно обеспечить гашение дуги подпитки за 0,3 и, соответственно, сократить бестоковую паузу ОАПВ до 0,5 с.

Наибольшие переходные напряжения на компенсационном реакторе наблюдались при отключении фазы линии. В части опытов эти перенапряжения были ограничены срабатываниями защитных аппаратов, параллельных компенсационным реакторам. В тех опытах на линии 750 кВ, которые не сопровождалось срабатыванием защитных аппаратов, напряжения на компенсационном реакторе достигало 130 кВ. Ограничители перенапряжений ОП1 — ОП4 обеспечили надлежащую защиту компенсационных реакторов на линии 765 кВ. Как и ожидалось, обычные вентильные разрядники, включенные параллельно компенсационному реактору на линии 750 кВ, не обеспечили надежного гашения тока из-за высокой частоты восстановления напряжения, близкой к 1,8 кГц. Хотя в некоторых опытах они и справились с гашением (рис. 4), многократные срабатывания

привели к разрушению двух вентиляльных разрядников, которыми был заменен защитный промежуток ИП1.

Использованные на линии 750 кВ стабилизированные защитные промежутки ИП показали себя работоспособными. В опытах зарегистрировано три срабатывания, при которых амплитуда тока через них достигала 630 А. Наибольшая продолжительность протекания тока в этих опытах составила 2,38 с; в реальных условиях продолжительность протекания тока будет существенно меньше. Учитывая, однако, что срабатывание ИП шунтирует компенсационный реактор, представляется предпочтительным защищать компенсационные реакторы сверхлинейными ограничителями перенапряжений аналогично тому, как это было сделано на линии 765 кВ. В типовой схеме ЧЛР, используемой ныне на советских линиях 750 кВ, для защиты компенсационного реактора применен ограничитель перенапряжений, обеспечивающий их снижение до 100—110 кВ и рассчитанный на ток 1,2 кА (при остающемся напряжении 125 кВ) и на воздействие напряжения 50 Гц с амплитудой 84 кВ в течение 3,5 с [11].

В вакуумных выключателях ВЗ — В6, примененных на линии 765 кВ в коммутируемой схеме ЧЛР, не было принято каких-либо специальных мер по предотвращению предпробоев при включениях и повторных зажиганиях при отключениях. Предпробои наблюдались примерно в половине включений, причем коммутации происходили до шести раз. Повторные зажигания наблюдались в трети отключений, причем коммутации происходили до 25 раз с общей продолжительностью до 2,4 мс. Интенсивность переходных процессов при повторных зажиганиях из-за более неблагоприятных начальных условий была несколько выше, чем при предпробоях, однако благодаря наличию ограничителей перенапряжений ни повторные зажигания, ни предпробои не сказались на работе ЧЛР.

Выключатель нагрузочного тока реактора 765 кВ ВО коммутировался в трех опытах на линии 765 кВ. Благодаря наличию в нем резистора его коммутации не сопровождалась сколь-нибудь значительными перенапряжениями.

Выводы. 1. Испытания подтвердили эффективность применения в линиях 750—765 кВ четырехлучевого реактора, в том числе коммутируемого на нетранспортиру-

емых линиях, для уменьшения установившихся тока подпитки и наведенного на отключенной фазе напряжения.

2. При ограничении амплитуды тока подпитки до 30—40 А время гашения дуги подпитки на линиях 750—765 кВ сокращается примерно до 0,3 с, и бестоковая пауза ОАПВ может быть снижена до 0,5 с. Гашение дуги в этих случаях происходит сразу после затухания апериодической составляющей в переходном токе подпитки.

3. Для ограничения перенапряжений на компенсационном реакторе наиболее целесообразно применять сверхлинейные ограничители перенапряжений.

4. Резонансные повышения напряжения на отключенной фазе линии 750 кВ ограничиваются короной до уровня 1,2—1,3 отн. ед.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование ОАПВ в электропередачах 750 кВ с шунтирующими реакторами/Н. Н. Беляков, В. В. Бургсдорф, В. С. Рашкес, К. В. Хоециан. — Электричество, 1981, № 7.
2. Knudsen N. Single — phase switching of transmission lines using reactor for extinction the secondary arc. — CIGRE, 1962, № 310.
3. Kimbark E. W. Suppression of ground — fault arcs on single — pole switched EHV lines by shunt reactors. — Trans. IEEE on PAS, 1964, vol. 83, № 3.
4. Беляков Н. Н., Рашкес В. С., Рожавская С. Н. Использование компенсационных реакторов для обеспечения ОАПВ на высоковольтных линиях. Электрические станции, 1975, № 12.
5. Single — pole switching on TVA'S Paradise — Davidson 500 kV line. Design concepts and staged fault test results/1. Edwards, J. W. Chadwich, H. A. Reich, I. E. Smith. — Trans. IEEE on PAS, 1971, vol. 90, № 6.
6. Shperling B. R., Fakheri A., Ware B. J. Compensation scheme for single — pole switching on untransposed transmission lines. — Trans. IEEE on PAS, 1978, vol. 97, № 7/8.
7. Haumbrich H. J., Hosemann G., Thomas R. Single — phase autoreclosing in EHV systems. — CIGRE, 1974, № 31—09.
8. Malevski R., Nourse G. R. Transient measurement techniques in EHV systems. — Trans. IEEE on PAS, 1978, vol. 97, № 5/6.
9. Рожавская С. Н., Шперлинг Б. Р. Резонансные напряжения промышленной частоты в неполнофазных схемах электропередач сверхвысоких напряжений. Труды НИИПТ, 1973, вып. 19.
10. Беляков Н. Н., Бринкис К. А., Рашкес В. С. Уточнение бестоковых пауз ОАПВ для линий 330 кВ по данным опыта их эксплуатации. — Электрические станции, 1982.
11. Исследование ОАПВ в электропередачах 750 кВ с четырехлучевым реактором/Н. Н. Беляков, Л. Д. Зилес, Н. П. Камнева и др. Электрические станции, 1982, № 12.

[19.05.83]

УДК 621.316.176.015.2

Электромагнитные помехи в системах электроснабжения промпредприятий

ЖЕЖЕЛЕНКО И. В., доктор техн. наук, ШИМАНСКИЙ О. Б., инж.

Жданов, Даугавпилс

Качество электроснабжения характеризуется способностью системы электроснабжения потребителя и распределительной сети обеспечивать требуемое качество электроэнергии на зажимах электроприемников и гарантированную надежность электроснабжения при возможных аварийных режимах, внешних и внутренних электромагнитных помехах. При анализе качества электроснабжения обычно оцениваются значения показателей, определенных ГОСТ 13109—67, и показателей надежности при гипотетических нарушениях электроснаб-

жения, вызываемых короткими замыканиями. Практика свидетельствует о недостаточности такого подхода.

Внедрение новой техники и технологии, обуславливающее применение принципиально новых решений в промышленной электроэнергетике, в ряде случаев сопровождается ухудшением качества электроснабжения (КЭС). Так, широкое применение вентиляльных преобразователей и электротехнологии, начавшееся в основном в 60-х годах, привело к возникновению проблемы высших гармоник. Прогрессирующее в последние годы

Таблица 1

Количество отказов электрооборудования и составляющие ущерба	Причины отказов						Коммутации и работа АПВ в сетях завода	Итого
	Двухфазные к.з. в энергосистемах	Однофазные к. з. в энергосистеме с δU , %						
		10	20	30	более 30			
Групповые отказы, 1/%	$\frac{32}{6,8}$	$\frac{66}{14}$	$\frac{43}{2,2}$	$\frac{100}{2}$	$\frac{26}{5,5}$	$\frac{267}{56,9}$	$\frac{469}{100}$	
Остановы отдельных видов электрооборудования, %	$\frac{799}{17,1}$	$\frac{1018}{18,5}$	$\frac{862}{21,8}$	$\frac{372}{8,0}$	$\frac{920}{19,7}$	$\frac{694}{14,8}$	$\frac{4665}{100}$	
То же, %	17,1			68,0		14,9	100	
Брак продукции, тыс. руб.	94,01			363,6		64,6	522,33	
Недоотпуск продукции, тыс. руб.	511,71			1976,5		354,64	284284	
Дополнительные расходы электроэнергии, (кВт·ч)/тыс. руб.	$\frac{876545}{80,6}$			$\frac{3390815}{312,0}$		$\frac{602335}{55,4}$	$\frac{4869655}{448,0}$	
Прочие дополнительные расходы, тыс. руб.	241,9			2935,6		166,2	1344,0	
Суммарный ущерб, тыс. руб.	$\frac{926,2}{18,0}$			$\frac{3588}{69,6}$		$\frac{640,8}{12,0}$	$\frac{5157,0}{100}$	

внедрение электронных и микроэлектронных систем управления, микропроцессоров и ЭВМ в системах электроснабжения промышленных предприятий (СЭС) привело к снижению уровня помехоустойчивости электроприемников и резкому возрастанию количества отказов электрооборудования. Вследствие значительного снижения надежности электроснабжения существенно возросли экономические ущербы, связанные, в первую очередь, с недоотпуском продукции. Практика свидетельствует о том, что основной причиной отказов является воздействие электромагнитных переходных помех (ЭПП), возникающих при электромагнитных переходных процессах как в сетях энергосистем, так и в СЭС. Эти помехи, неизбежные в реальных электрических сетях, в момент возникновения проявляются, как правило, в виде резкого снижения (посадки) напряжения. Длительность протекания переходных процессов составляет от нескольких периодов промышленной частоты до нескольких секунд, а эффективная полоса частот помех может простираться до десятков мегагерц [1].

В промышленной электроэнергетике ЭПП рассматривались в основном при решении вопросов использования силовых цепей в качестве каналов для передачи информации, поскольку влияние ЭПП на электрооборудование, а также системы управления практически не проявлялось; учитывалось лишь влияние посадок напряжения на коммутационную аппаратуру, в первую очередь, контакторы и магнитные пускатели. В настоящее время изучение ЭПП, методов прогнозирования и защиты от них стало важной и актуальной научно-технической и народнохозяйственной задачей. Вопросу ЭПП уделяется большое внимание за рубежом [1, 2 и др.].

В данной статье рассматриваются некоторые аспекты указанной задачи.

Классификация и характеристика электромагнитных переходных процессов. Существуют различные принципы классификаций ЭПП: в зависимости от типов помех (импульсные, флуктуационные и др.); источников, генерирующих их (как правило, различные виды электрооборудования); происхождения (промышленные, атмосферные); места возникновения (внешние, т. е. возникающие в энергосистеме, и внутренние, генерируемые в СЭС). Мы будем использовать последнюю градацию;

правомерность этого подхода подтверждается практикой: обычно более 80% аварийных ситуаций в СЭС, обусловленных воздействием ЭПП, связано с внешними помехами.

В качестве примера на рис. 1 показаны основные ВЛ, узлы энергосистемы и зона влияния ЭПП энергосистемы на помехочувствительные электроприемники (ПЧЭ) завода химического волокна. Как видно из этого рисунка, площадь зоны влияния и протяженность ее ВЛ составляют небольшую часть энергосистемы. Статистика отказов ПЧЭ завода приведена в табл. 1, в которой использованы данные за 1977—1980 гг. Ущерб от отказов за указанный период также дан в табл. 1.

Количество отказов и ущерб, вызванный генерируемыми в заводской распределительной сети ЭПП, составляют менее 16 % суммарных значений. В то же время каждая внешняя ЭПП приводит к останову в среднем 20 единиц технологического оборудования.

Глубина посадок напряжения δU , относительная частота их n и количество остановов механизмов N за летний период 1980 г. представляются следующим образом:

δU , %	0—10	10—20	20—30	>30
n , %	22,3	35,5	26,2	16,0
N , %	5,2	22,0	31,4	42,4

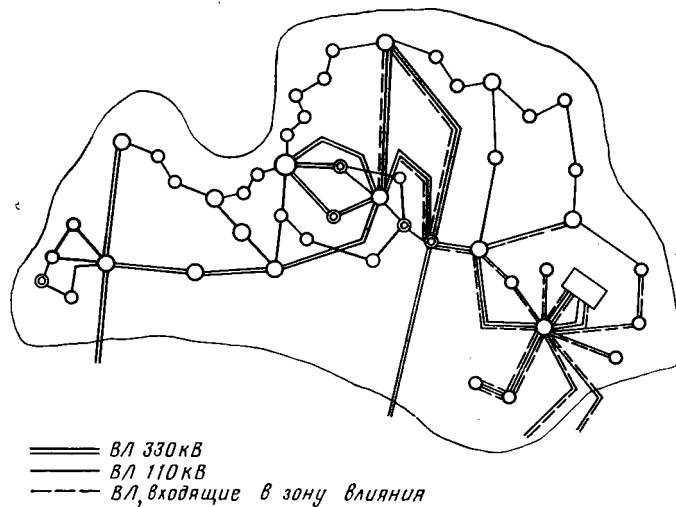


Рис. 1. Зона влияния ЭПП энергосистемы на ПЧЭ

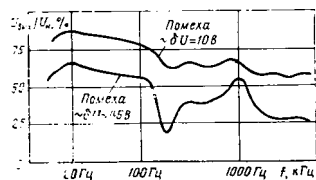


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика электронной системы управления при введении искусственной помехи: а — $\delta U = 10$ В; б — $\delta U = 45$ В

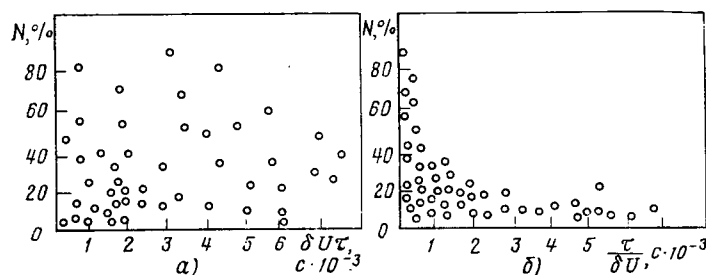


Рис. 3. Распределение числа отказов N ПЧЭ при аргументах $\delta U \tau$ (а) и $\tau / \delta U$ (б)

Из приведенных данных следует, что количество посадок с глубиной до 20 % составляет 57,8 % общего числа. Этот результат хорошо коррелирует с аналогичным результатом для распределительных сетей Франции — 59 % [2]. Однако более 2/3 остановов механизмов приходится на посадки с $\delta U > 20$ %; в то же время колебания напряжения в пределах, допустимых согласно ГОСТ 13109—67, при отсутствии других видов электромагнитных помех не приводят к отказам электронных систем автоматики.

Статистика отказов, вызываемых ими экономических ущербов, и характеристика ЭПП для СЭСД других отраслей промышленности аналогичны. Так, при самоликвидировавшемся межфазном коротком замыкании (к. з.) на ВЛ 330 кВ отключилось большое количество тиристорных электроприводов, что привело к нарушению технологического процесса комплекса толстостенового цеха горячего проката и кислородно-конверторного цеха металлургического завода. Кратковременное снижение напряжения достигало 20 % номинального значения.

Многолетняя практика свидетельствует, что внешние ЭПП возникают в основном при однофазных замыканиях ВЛ вследствие перекрытия изоляции. Эти повреждения либо самоликвидируются, либо исчезают после кратковременного отключения с последующим АПВ. Поэтому в работе рассматриваются ЭПП, связанные главным образом с указанными причинами. Следует отметить, что определенную роль играют и межфазные короткие замыкания, возникающие в результате атмосферных явлений. Увеличение мощности энергосистемы и количества ВЛ, применяемое для повышения надежности энергоснабжения предприятий, приводит к снижению надежности функционирования сложных электронных систем управления и увеличению числа отказов ПЧЭ.

В СЭСД появление ЭПП связано с перенапряжениями, которые возникают при однофазных замыканиях на землю, оперативных и аварийных коммутациях. В компенсированных сетях возникает меньшее количество перенапряжений и с меньшими амплитудами, чем в некомпенсированных; соответственно и частота возникновения и интенсивность воздействия внутренних ЭПП на ПЧЭ больше в некомпенсированных сетях.

Коммутационные перенапряжения в СЭСД, запро-

ектированных с соблюдением требований ПУЭ, не считаются опасными для электрооборудования. Однако при наличии ПЧЭ, как показывает практика, возникают отказы последних при отключении ненагруженных кабельных линий и трансформаторов, при коммутациях батарей конденсаторов и резонансных фильтров; при неодновременной коммутации контактов выключателей и другой коммутационной аппаратуры, а также при возникновении неполнофазных режимов вследствие других причин, приводящих к феррорезонансным явлениям.

Отмеченные обстоятельства, очевидно, должны учитываться при проектировании и эксплуатации СЭСД.

Особенности воздействия ЭПП на электронные системы. Восприимчивость электронного оборудования к ЭПП в значительной мере объясняется особенностями его амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), с одной стороны, и АЧХ ЭПП — с другой. Снижение максимальных значений АЧХ электронных систем управления с ростом частоты оказывается небольшим (рис. 2); в то же время при быстрых снижениях напряжения амплитудный спектр ЭПП имеет большую ширину. Таким образом, крутизна фронта посадки напряжения имеет существенное влияние на вероятность отказа ПЧЭ. В рассмотренном выше примере СЭСД химического волокна более 50 % всех остановов технологических механизмов возникало при весьма кратковременных посадках напряжения ($0,05 \div 0,1$ с).

Для большинства ПЧЭ зависимость порога отказов $P_{от}$ от δU и τ с весьма высокой степенью точности аппроксимируется выражением вида

$$P_{от} = \delta U \sqrt{\tau}. \quad (1)$$

Например, для элементов логики серии «Т» $n = 3,5$; для элементов логики серии «Транслог» (ГДР) $n = 2,7$. Приведенные зависимости справедливы при отсутствии других нарушений качества электроэнергии и, в первую очередь, при отсутствии высших гармоник.

Если рассмотреть совокупность отказов различных ПЧЭ, то обычно применяемый для характеристики отказов критерий — произведение размаха на время изменения («доза» помехи) — имеет практически некоррелированный характер (рис. 3, а). Напротив, отношение $\tau / \delta U$ дает вполне определенную зависимость числа отказов от этого фактора (рис. 3, б).

Возникновение нарушения нормальной коммутации вентильных преобразователей, системы импульсно-фазового управления которых работают в сочетании с электронными или микроэлектронными системами автоматики, связано не только с параметрами ЭПП; оно зависит также от других факторов; в частности, от текущего значения угла управления α . Рассмотрим этот вопрос подробнее.

При реально наблюдаемых кратковременных снижениях напряжения в одной фазе сети возможно нарушение коммутации вентильных преобразователей. Проанализируем это явление применительно к преобразователям с системой импульсно-фазового управления, основанной на широко распространенном «вертикальном» принципе. Будем полагать, что несимметрия, высшие гармоники и колебания напряжения в узле подключения вентильного преобразователя отсутствуют.

Перекрытия изоляции ВЛ, при которых ВЛ отклю-

чается с последующим АПВ, являются однофазными замыканиями через дугу. Сопротивление дуги рассматривается как чисто активное [4]. В этом случае, как показали многочисленные расчеты для реальных сетей, а также экспериментальные данные, на стороне 6—10 кВ треугольник линейных напряжений искажается значительно меньше, чем в сети энергосистемы; углы между векторами фазных напряжений находятся в пределах от 115 до 125°. В значительной мере это объясняется отсутствием составляющих нулевой последовательности в сетях 6—10 кВ, поскольку трансформаторы связи с энергосистемой имеют на этом напряжении обмотку, соединенную в треугольник. Векторы фазных напряжений в сети 0,38 кВ сдвинуты относительно друг друга на 118—122°. Будем полагать сдвиг между фазными напряжениями равным $2/3\pi$.

При перекрытии одной из фаз ВЛ энергосистемы относительное значение остаточного напряжения в распределительной сети

$$\beta = \frac{U_{\phi m} - \delta U_{\phi}}{U_{\phi m}}, \quad (2)$$

где $U_{\phi m}$ — амплитуда фазного напряжения в нормальном симметричном режиме.

Напряжения других фаз возрастают; относительное увеличение напряжения следующей «отстающей» фазы обозначим через γ . Мгновенное значение линейного напряжения

$$u = \beta U_{\phi m} \left[\sin \omega t - \frac{\gamma}{\beta} \sin \left(\omega t + \frac{2}{3} \pi \right) \right]. \quad (3)$$

Это выражение может быть преобразовано:

$$u = \delta \sqrt{1 + \rho + \rho^2} U_{\phi m} \sin \left(\omega t - \arctg \frac{\rho \sqrt{3}}{\rho + 2} \right), \quad (4)$$

где $\rho = \gamma/\beta$.

Амплитуда управляемого напряжения в момент отключения очередного вентиля определяется углом α ; значение ее при снижении напряжения в одной из фаз на основании рис. 4

$$U_{\max} = \delta \sqrt{1 + \rho + \rho^2} U_{\phi m} \sin \left(\arctg \frac{\rho \sqrt{3}}{\rho + 2} + \alpha - \frac{\pi}{6} \right). \quad (5)$$

Связь между граничными значениями угла управления α_{rp} и ρ , определяющими условия устойчивой коммутации вентильных преобразователей:

$$\alpha_{rp} = \frac{\pi}{6} - \arctg \frac{\rho \sqrt{3}}{\rho + 2}. \quad (6)$$

Кривая $\alpha_{rp}(\rho)$, представленная на рис. 5, показывает, что при снижении напряжения в фазе, превышающем для конкретного значения предельно допустимую величину $\beta_{пр} = \gamma/\rho$, управляемые вентили в следующий за переходным процессом полупериод не откроются; это явление будет иметь место даже при питании системы от автономного источника. Приведенные соотношения и результаты полностью подтверждены экспериментами.

Таким образом, отказ ПЧЭ определяется параметрами ЭПП, которые, в свою очередь, зависят от схемы сетей энергосистемы и СЭСП и состава потребителей, а также от режима работы вентильного преобразователя, определяемого углом α . Практика и экспериментальные исследования показывают, что несинусоидальность, ко-

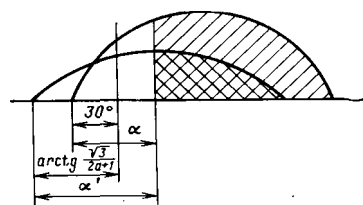


Рис. 4. Изменение управляемого напряжения при посадке напряжения

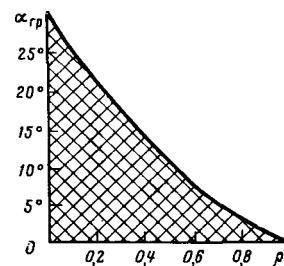


Рис. 5. График зависимости $\alpha_{rp}(\rho)$

лебания и отклонения напряжения усиливают восприимчивость ПЧЭ к ЭПП, однако в неравной степени.

Комплексная оценка влияния КЭС и ЭПП на ПЧЭ. На основании сделанного выше заключения о комплексном влиянии ряда факторов, в условиях которых происходит посадка напряжения, на возникновение отказов ПЧЭ были выполнены статистические исследования нескольких реальных электронных систем. Для исследования использовались имитатор помех и физическая модель энергосистемы, в которой варьировались состав и параметры нагрузок, конфигурация электрической сети и расположение ПЧЭ.

Определение основных факторов воздействия на ПЧЭ выполнено на основе статистического материала, организованного в виде матриц отказов в соответствии с положениями регрессионного анализа. Рассматривались два случая: 1) несинусоидальность напряжения сети обуславливается «собственными» нелинейными нагрузками; значение k_{nc} находится в пределах, допустимых ГОСТ 13109—67; 2) несинусоидальность напряжения сети значительна ($k_{nc} \gg 0,05$) и определяется не только «собственными» источниками гармоник, но и гармониками, протекающими из СЭСП других предприятий и энергосистемы.

В первом случае значение порога отказа $\Pi(x)$ практически однозначно определяется следующими факторами: выбором узла подключения ПЧЭ (фактор x_1); фазой напряжения в момент возникновения ЭПП (фактор x_2); значением δU (фактор x_3); значением угла α вентильного преобразователя (фактор x_4) и составом нагрузок в узле подключения ПЧЭ (фактор x_5). Для предварительной оценки функция $\Pi(x)$ принята линейной:

$$\Pi_{от}(x) = a_0 + \sum_{k=1}^5 a_k x_k. \quad (7)$$

На основании данных полного факторного эксперимента для этого уравнения была составлена матрица, фрагмент которой приведен в табл. 2. Фактор x_1 принимался равным сопротивлению короткого замыкания в узле в относительных единицах; x_2 — в радианах; x_3 — в единицах относительно номинального значения; x_4 — в единицах относительно $\alpha = \pi/2$; x_5 — в единицах, взятых как отношение номинальных значений полных мощностей нелинейных и всех нагрузок.

Уравнение регрессии, полученное на ЭВМ,

$$\Pi_{от}(x) = -0,59 + 0,37x_1 - 0,74x_2 + 1,77x_3 + 0,49x_4 + 1,57x_5. \quad (8)$$

Коэффициент множественной корреляции $R = 0,8$, F-критерий равен 8,25, дисперсионное отношение составляет 3,16.

Из уравнения (8) можно заключить, что факторами,

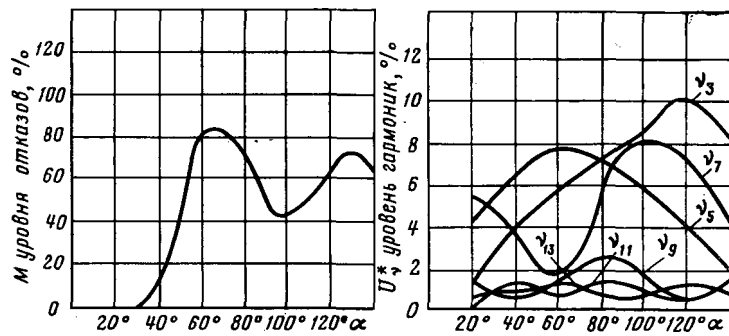


Рис. 6. Зависимость математического ожидания числа отказов и уровня отдельных гармоник от угла управления вентильного преобразователя

в наибольшей мере влияющими на возникновение отказа ПЧЭ, являются значения δU и состав нагрузок, подключенных к узлу сети.

Значения коэффициентов $a_0 = -0,59$ и $a_4 = 0,49$ позволяют сделать вывод, что в большинстве случаев изменение α еще недостаточно для отказа ПЧЭ, но в конкретных случаях его необходимо учитывать.

Во втором случае ($k_{nc} \gg 0,05$), как показал анализ, к числу наиболее значимых факторов следует отнести также состав и уровень отдельных гармоник напряжения.

На рис. 6 представлена зависимость математического ожидания числа отказов $M_{от}$ ПЧЭ при различных δU и уровнях отдельных гармоник в зависимости от α для конкретного узла энергосистемы и сочетания нагрузок. Из рассмотрения кривых следует, что экстремумы кривой $M_{от}$ совпадают с экстремумами напряжения отдельных гармоник. Следует подчеркнуть, что полученный результат справедлив для различных электронных систем управления независимо от схемного решения и их элементной базы.

Из приведенного выше анализа следуют основные пути минимизации влияния ЭПП на рассматриваемые ПЧЭ.

1. Необходимо в раздел о колебаниях напряжения ГОСТ 14109—67 включить положение об ограничении единичных снижений напряжения в распределительных сетях некоторым фиксированным значением.

2. При оценке оптимальных значений токов короткого замыкания на стадии проектирования следует учитывать необходимость снижения величины посадок напряжения; их допустимые значения должны выбираться совместно проектировщиками сетей энергосистем и ЭСП.

Таблица 2

№ п/п	$P_{от}$	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
1	0	0,31	0	0,1	0	0,20
2	0	0,31	0,33	0,2	0,14	0,25
3	0,6	0,31	0,66	0,3	0,29	0,43
4	0,9	0,31	0	0,4	0,43	0,21
5	0	0,31	0,33	0,1	0,57	0,11
6	0	0,31	0,66	0,2	0,71	0,30
7	0,7	0,31	0	0,3	0,86	0,20
8	0,1	0,31	0,33	0,4	0,10	0,25
9	0	0,31	0,663	0,1	0,14	0,43
10	1,0	0,31	0	0,2	0,29	0,36
11	0,5	0,23	0,333	0,3	0,43	0,21
12	0	0,23	0,66	0,4	0,57	0,11
13	0	0,23	0	0,1	0,71	0,30
14	1,0	0,23	0,333	0,2	0,86	0,56
15	0	0,23	0,66	0,3	0,10	0,20
16	0	0,23	0	0,4	0	0,25
17	0	0,23	0,333	0,1	0,14	0,43
18	0	0,23	0,66	0,2	0,29	0,36
19	0,9	0,23	0	0,3	0,43	0,21
20	0,9	0,23	0,333	0,4	0,57	0,11
21	0	0,015	0,66	0,1	0,71	0,30
22	1,0	0,015	0	0,2	0,86	0,56
23	1,0	0,015	0,33	0,3	0,10	0,56
24	0	0,015	0,615	0,4	0	0,30
25	0	0,015	0	0,1	0,14	0,11
26	0	0,015	0,33	0,2	0,29	0,21
27	0	0,015	0,66	0,3	0,43	0,36
28	1,0	0,015	0	0,4	0,56	0,43
29	0	0,015	0,33	0,1	0,71	0,25
30	0	0,015	0,66	0,2	0,86	0,20

3. Для ответственных ПЧЭ можно применять автономные источники питания систем управления в сочетании с быстродействующими системами АВР, обеспечивающими переключение источников питания без коммутационных искажений напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mathur B. K. Service supply line protection an industrial plant user's vien. — Industrial and commercial power system technical conference. Houston, Tex., 1980, № 4.
2. Jomier R. Analyse di la qualite du service des r'eseaux d'energie electrique. — RGE, 1976, vol. 85, № 6.
3. Caracteristiques de la tension d'alimentation electrique des consommateur alimentes en basse tension. — UNIPED, Paris, 1980.
4. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. — М.: Энергия, 1964.
5. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. — М.: Энергия, 1974.

[16.12.81]

УДК 621.311:338

Электротехнология в народном хозяйстве СССР

ДОНСКОЙ А. В., доктор техн. наук

Ленинград

С каждым годом возрастает актуальность электроэнергетики как отрасли науки и техники. В ее развитии целесообразно рассматривать три основных направления.

К первому следует отнести комплекс проблем, связанных с производством электрической энергии традиционными и перспективными средствами. Второе объе-

диняет вопросы создания энергосистем, передачи и распределения электроэнергии. Третье направление включает наиболее широкий круг технических, экономических и экологических проблем использования электрической энергии в производственных процессах и бытовых условиях.

При непрерывно возрастающих темпах использования всех видов энергоресурсов и, следовательно, в связи с необходимостью их наиболее экономного использования последнее направление в энергетике нашей страны представляется наиболее актуальным. Основанием для такого утверждения является тот факт, что при использовании электрической энергии в производственных процессах и бытовых условиях реальные возможности сокращения затрат энергоресурсов страны на единицу продукции достигают десятков и даже сотен процентов.

Последнее утверждение касается не столько таких традиционных потребителей электрической энергии, как электродвигатели и электроосветительные приборы, сколько относится к сравнительно новым потребителям, какими являются электротехнологические установки (ЭТУ). По основным признакам технологических процессов эти установки часто классифицируются как электрометаллургические, электрохимические, электротермические, электросварочные, установки электронно-ионных технологий, ЭТУ размерной обработки и др. Среди перечисленных ЭТУ имеется большое число разновидностей, отличающихся конструктивными особенностями, способом преобразования электрической энергии и электроэнергетическими параметрами.

Многие электротехнологические процессы и установки могут одновременно рассматриваться и как электрометаллургические, и как электрохимические, и как электротермические, так как имеют общие физико-химические, энергетические и технические основы. Комплекс научных и практических проблем исследования, разработки и создания электротехнологических процессов и установок привел к представлению о сравнительно новой отрасли науки и техники, именуемой электротехнологией.

Успех выполнения электротехнологических процессов в значительной степени предопределяется успешным решением задач создания и оптимизации условий эксплуатации ЭТ установок. Динамика развития электротехнологии с наибольшей объективностью характеризуется возрастающей энергоемкостью различных ЭТ процессов. В табл. 1 [1] приводятся данные американского института по прогнозированию первичного производства стали в мире. Если учесть возрастающее производство электростали после электрошлакового, электронного, плазменного и индукционного переплава в вакуумных печах, а также электростали, производимой в фасонно-литейных цехах машиностроительных заводов, цифры табл. 1 по производству электростали окажутся значительно заниженными.

Предполагаемое увеличение производства стали в электроплавильных (в основном электродуговых) печах,

Таблица 1

Годы	Способ производства стали, %			
	кислородно-конверторный	электроплавка	мартеновский	бессемеровский
1965	16,4	12	59	12,6
1970	41,5	13,8	38,8	5,9
1975	52,7	14,4	30,7	2,2
1980	62	20,0	17,1	0,9
1985	65	28,0	6,5	0,5
1990	62	34,0	3,8	0,2
1999	57	41,0	1,9	0,1

Таблица 2

Потребители	Годы							
	1928	1932	1937	1940	1945	1955	1962	1980
Электродвигатели	83,3	78,7	69,1	68,6	62,2	62,7	61,7	59
Электротехнологические установки	2,0	7,3	17,0	18,1	25,2	26,6	28,6	31

Таблица 3

Отрасль промышленности	Электропривод	Электротехнология
Черная металлургия	59,2	21,9
Цветная металлургия	30,8	59,3
Химическая	65,4	24,5
Электротехническая	27,9	37,7
Станкостроение	29,5	50,9
Приборостроение	50,0	27,6
Сельскохозяйственное машиностроение	34,5	42,0
Автомобилестроение	46,0	25,0

мощность которых уже теперь достигает 100 МВт в единице, оправдывается необходимостью улучшения качества продукции, уменьшением топливных энергоресурсов планеты и возрастающей ролью атомной электроэнергетики. Производство всех марок электросталей, легированных многими химическими элементами, приводит к увеличению производства ферросплавов в рудно-термических печах, мощность которых в единице достигает 150 МВт.

Объективными показателями стремительного повышения роли электротехнологических установок и процессов в электроэнергетике, в особенности в период первых пятилеток, могут быть данные табл. 2 [2 и 3], характеризующие относительное изменение потребления электрической энергии в промышленности нашей страны двумя основными потребителями — электродвигателями и ЭТ установками.

В табл. 3 [4] по данным 1971 г. сопоставляется относительная энергоемкость двух основных видов потребителей электроэнергии в различных отраслях промышленности, свидетельствующая о большом удельном весе электротехнологии.

В последующие годы соотношение потребителей электроэнергии будет изменяться, безусловно, в пользу электротехнологических установок. Основанием для такого вывода является то, что в черной металлургии, например, будет развиваться процесс прямого восстановления металлов из руд электротехнологическими средствами. Успешно развиваются процессы электрошлакового, плазменного и электронного переплава металлов в кристаллизаторах с получением изделий заданных форм [5], что сокращает процессы последующей механической обработки.

В цветной металлургии неуклонно растет мощность электролизных и специальных электротермических агрегатов и комбинатов. В химической промышленности уже теперь широко применяются электро-термо-химические способы производства фосфора и многих других специальных продуктов. Все машиностроительные отрасли промышленности ускоренно оснащаются установками для индукционного нагрева металлов при их пластической и термической обработке.

На многих машиностроительных и приборостроительных заводах успешно внедряются электрохимические, электроплазменные, ультразвуковые, электроискровые, электронно-лучевые, лазерные и другие установки для размерной обработки деталей сложных конфигураций из сверхтвердых материалов.

В связи с развитием индустриальных методов в сельскохозяйственном производстве предполагается широкая электрификация процессов приготвления кормов с применением различных электронагревательных и облучающих установок. Для улучшения бытовых условий в поселках не городского типа опережающими темпами будет развиваться бытовая электротехнология.

Изготовление современных полупроводниковых приборов не представляется возможным без зонной очистки кремния, германия и других материалов.

Опережающие темпы развития электротехнологических процессов во всех отраслях промышленности обуславливаются, в первую очередь, невозможностью получения продукции другими средствами. К числу такой продукции относятся чистые цветные металлы, сплавы специального назначения, очищенные полупроводниковые материалы, ферросплавы и др.

В тех случаях, когда технологический процесс может быть осуществлен без непосредственного применения электрической энергии, ее использование оправдывается существенным улучшением качества продукции, сокращением металлоемкости, экономическими соображениями или существенно уменьшенными приведенными затратами.

Можно предполагать, что к концу XX столетия электротехнологические установки в народном хозяйстве страны будут потреблять не менее 30 % всей вырабатываемой электроэнергии.

Исходя из этого, для достижения наибольшей народнохозяйственной эффективности электротехнологии необходимо использовать все пути экономии энергоресурсов. Первым из них является выбор оптимальных способов преобразования электрической энергии, типов электротехнологических устройств и источников питания.

Электротехнологические установки весьма разнообразны. Они состоят из электротехнологических устройств в виде электрических нагревателей, сварочных аппаратов, электролизеров, плазмотронов и т. п., основанных на явлениях электрической дуги (плазмы), индуцированных токов в электропроводящих материалах, поляризации в диэлектриках и полупроводниках, радиационных и электронно-ионных излучений. При этом каждый способ преобразования электрической энергии, являясь основой создания электротехнологических устройств, в значительной степени предопределяет и их электрические параметры, и энергетические характеристики. Почти все электротехнологические устройства, отличаясь сильно меняющимися электрическими параметрами и специфическими режимами эксплуатации, требуют специальных источников питания в виде согласующихся трансформаторов, симметрирующих схем, электромашиных преобразователей рода или частоты тока, электронно-ионных или полупроводниковых выпрямителей, инверторов со сложными схемами автоматического регулирования и стабилизации и т. п.

При большой мощности и энергоемкости электротехнологических установок, при решении многих проблем их создания и эксплуатации оказывается необходимым непосредственно учитывать их связь с энергосистемой

и рассматривать в совокупности с электрическими станциями, потребляющими энергоресурсы страны.

При оценке энергетических затрат и выявлении путей их сокращения необходимо исходить из точного представления о теоретически необходимой для осуществления технологических процессов энергии W_1 с учетом всех возможных экзотермических и эндотермических реакций W'_1 .

Для большинства электротехнологических устройств эти величины позволяют написать выражение их технологического к. п. д.:

$$\eta_T = \frac{W_1}{W_1 + W_2} = \frac{1}{1 + \frac{\alpha F (T_2 - T_1)_{\text{Ft}}}{cm (T_2 - T_1)_{\text{M}}}},$$

где $(T_2 - T_1)_{\text{F}}$ — разность температур между теплоотдающей поверхностью F и окружающей средой; $(T_2 - T_1)_{\text{M}}$ — разность между конечной и начальной температурами нагреваемых объектов.

Из этого выражения следует, что для увеличения η_T целесообразно сокращать время технологического процесса t , уменьшать отношение произведения коэффициента теплоотдачи α на теплоотдающую поверхность F к произведению теплоемкости c на массу нагреваемого материала m . Все эти соображения приводят к целесообразности увеличения удельных мощностей электротехнологических потребителей и массы одновременно обрабатываемого материала.

Выбирая тот или иной способ преобразования электрической энергии в каждом отдельном случае и определяя электрический к. п. д. технологического устройства $\eta_{\text{э}}$, можно найти и полный его к. п. д.:

$$\eta_{\text{п}} = \eta_T \eta_{\text{э}} = \varphi \left[\alpha, t, \frac{F}{m}, (T_2 - T_1)_{\text{F}}, (T_2 - T_1)_{\text{M}} \right].$$

Для оценки к. п. д. электротехнологической установки $\eta_{\text{у}}$ необходимо знать к. п. д. источника питания $\eta_{\text{и}}$ в зависимости от коэффициента использования его по мощности и по времени.

Таким образом, к. п. д. электротермической установки

$$\eta_{\text{у}} = \eta_T \eta_{\text{э}} \eta_{\text{и}}$$

не может иметь однозначного значения без учета всей совокупности условий выполнения технологических процессов и переменных энергетических характеристик.

Если те или иные технологические процессы могут быть осуществлены не только с непосредственным использованием электрической энергии, но и с помощью других энергоносителей (газ, мазут, уголь и др.), то, очевидно, энергетические основы развития электротехнологии должны предусматривать объективную и всестороннюю оценку каждого из них.

Для районов с преобладающим количеством электроэнергии, получаемой от тепловых станций, сжигающих газ, который непосредственно мог бы быть использован для выполнения технологического процесса, при сравнении различных видов энергоносителей необходимо учитывать и к. п. д. линий передач со всеми подстанциями $\eta_{\text{л}}$, оцениваемый в пределах $0,8 \div 0,9$, и к. п. д. современных тепловых электрических станций $\eta_{\text{ст}} = 0,35 \div 0,36$.

Итогом анализа энергетических характеристик всех элементов электротехнологических установок и энергосистемы (энергетических станций, подстанций и линий

передач) должно быть сравнение общих к. п. д. процессов, осуществляемых при сжигании различных видов топлива $\eta_{от}$ или использовании электрической энергии $\eta_{э}$:

$$\eta_{от} = 0,1 \div 0,8 \geq \eta_{т} \eta_{э} \eta_{и} \eta_{л} \eta_{ст} \approx 0,05 \div 0,25.$$

При этом должно быть обращено особое внимание на использование либо возможных естественных условий осуществления тех или иных процессов (сушки, полимеризации и т. п.), либо вторичных энергоресурсов.

Энергетические предпосылки к развитию электротехнологии состоят в использовании всех способов увеличения общих к. п. д. электротехнологических установок. В настоящее время электротехнология является единственной отраслью электроэнергетики, обладающей столь огромными резервами экономии электрической энергии.

Исходя из изложенного, можно сформулировать следующие энергетические основы развития электротехнологии:

1. С целью достижения минимальных энергетических затрат при осуществлении электротехнологических процессов необходимо проводить объективные технико-экономические обоснования выбора энергоносителей на практически обозримый период времени.

2. При доказанной целесообразности применения электрической энергии в качестве энергоносителя для осуществления технологических процессов почти одно-

временно возникают практически важные задачи выбора способа ее преобразования, а также определения при заданной производственной программе оптимальных объемов или поверхностей обрабатываемых материалов с учетом электрических параметров и энергетических характеристик электротехнологических устройств.

3. Завершающим этапом создания электротехнологических установок, отвечающих наивысшим энергетическим и общим технико-экономическим показателям, является выбор источника питания со всеми элементами схем управления, контроля и автоматизации. Однако наибольшие возможности для улучшения этих показателей можно получить лишь при оптимальной их эксплуатации, что безусловно зависит от наличия соответствующих специалистов [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экспресс-информация черной металлургии. № 48. реф. 185, 1970.
2. Промышленность СССР. Статистический сборник.— М.: Статистика, 1964.
3. Энергетика СССР в 1976—1980 годах. Под ред. А. М. Некрасова и М. Г. Первухина.— М.: Энергия, 1977.
4. Энергетика СССР в 1971—1975 годах. Под ред. А. С. Павленко и А. М. Некрасова.— М.: Энергия, 1972.
5. Плазменные процессы в металлургии и технологии керамических материалов/Б. Е. Патон и др.— М.: Наука, 1973.

[07.02.83]



УДК 621.314.632.001.1

Анализ вентильных преобразователей с применением модуль-функций

БЕРКОВИЧ Е. И.

Таллин

Теория вентильных преобразователей, формировавшаяся в условиях интенсивного проникновения преобразовательной техники в самые различные отрасли промышленности, получила достаточно глубокое и разностороннее развитие.

Вместе с тем, методология анализа и синтеза преобразовательных устройств зачастую совершенно различна и зависит от вида исследуемого устройства, режима работы, характера электромагнитных процессов, степени сложности нагрузки. В статье делается попытка изложить с единых позиций некоторые вопросы теории вентильных преобразователей исходя из их аналитической модели.

Основным элементом вентильного преобразователя является неуправляемый вентиль — диод и управляемый — тиристор. Идеализированная вольт-амперная характеристика (ВАХ) диода представлена на рис. 1, а. Пренебрежение падением напряжения и током утечки при современном уровне полупроводниковых приборов в общем случае не вызывает сомнений, тем более что при необходимости эти параметры можно учесть введением последовательных и параллельных резисторов и э. д. с. Напряжение u_V и ток i_V диода удовлетворяют неравенствам

$$-u_V \geq 0, i_V \geq 0, \quad (1)$$

причем $i_V = 0$ или $i_V = 0$.

В дальнейшем будет исходить из основополагающего правила, позволяющего заменить неравенства $A_1 \geq 0$, $A_2 \geq 0$ одним, им эквивалентным [1]:

$$\lambda_1 A_1 + \lambda_2 A_2 - |\lambda_1 A_1 - \lambda_2 A_2| \geq 0,$$

где $\lambda_1 > 0$, $\lambda_2 > 0$ — произвольные величины, или, если $A_1 = 0$ или $A_2 = 0$, одним равенством

$$\lambda_1 A_1 + \lambda_2 A_2 - |\lambda_1 A_1 - \lambda_2 A_2| = 0. \quad (2)$$

В связи с частым использованием в дальнейшем изложении введем для краткости записи следующие операции над величинами A_1 и A_2 :

$$\lambda_1 A_1 \oplus \lambda_2 A_2 = \frac{1}{2} (\lambda_1 A_1 + \lambda_2 A_2 + |\lambda_1 A_1 - \lambda_2 A_2|), \quad (3a)$$

$$\lambda_1 A_1 \ominus \lambda_2 A_2 = \frac{1}{2} (\lambda_1 A_1 + \lambda_2 A_2 - |\lambda_1 A_1 - \lambda_2 A_2|). \quad (3b)$$

Если операции « $\oplus$ », « $\ominus$ » выполняются последовательно над i величинами, то каждая j -я величина, кроме первой, умножается на 2^{j-2} , а общий результат делится на 2^{i-1} .

На основании (1) и (2) ВАХ диода запишется следующим образом:

$$|u_V + r i_V| + u_V - r i_V = 0, \quad (4a)$$

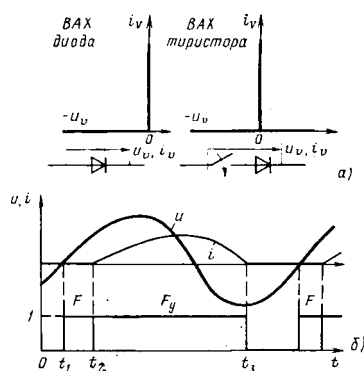


Рис. 1

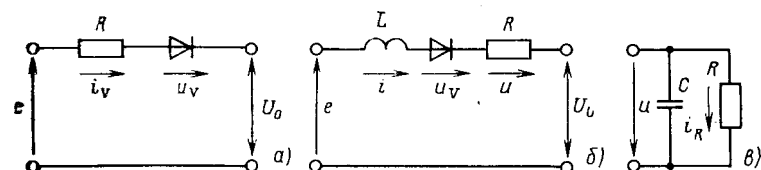


Рис. 2

или в сокращенной записи

$$u_v \oplus (-ri_v) = 0.$$

Здесь r — произвольная положительная величина, имеющая размерность сопротивления.

Возможна и параметрическая запись уравнения ВАХ диода [2]:

$$\left. \begin{aligned} u_v &= \frac{1}{2} (s - |s|); \\ i_v &= \frac{1}{2r} (s + |s|), \end{aligned} \right\} \quad (46)$$

где s — промежуточный параметр.

Введением единичной функции управления F_y , имеющей длительность, не меньшую, чем интервал проводимости тиристора (рис. 1, б: $t_2 - t_3$) и единичной функции запрета F (рис. 1, б: $t_1 - t_2$) можно записать ВАХ тиристора как в форме (4), так и (5).

В качестве простейшей иллюстрации рассмотрим однофазную неуправляемую схему с резистивным (рис. 2, а) и резистивно-индуктивным (рис. 2, б) входом с нагрузкой в виде э. д. с. U_0 (однополупериодный выпрямитель или инвертор).

В случае рис. 2, а для диода получаем

$$u_v = e - i_v R - U_0, \quad (5)$$

что с учетом (4а) и равенства $r = R$ дает

$$i_v = \frac{1}{2R} (|e - U_0| + e - U_0). \quad (6a)$$

В случае рис. 2, б, также для диода, получаем

$$u_v = e - i_v R - L \frac{di_v}{dt} - U_0,$$

а с учетом (4а) и равенства $r = R$

$$i_v = \frac{1}{2R} \left(\left| e - L \frac{di_v}{dt} - U_0 \right| + e - L \frac{di_v}{dt} - U_0 \right).$$

Сопоставляя полученное выражение с параметрической записью тока через диод (4б), имеем окончательно

но (при $i_v > 0$)

$$e - \frac{L}{R} \frac{ds}{dt} - U_0 = s$$

или

$$\left. \begin{aligned} \frac{L}{R} \frac{ds}{dt} + s &= e - U_0 \\ i_v &= \frac{1}{2R} (s + |s|). \end{aligned} \right\} \quad (66)$$

и в целом

К простейшим однофазным схемам (рис. 2), режим работы которых и выражения (6) непосредственно вытекают из физической сущности этих схем, сводятся и более сложные схемы преобразования.

Рассмотрим далее m -пульсную лучевую вентильную схему преобразования (рис. 3, а) при мгновенной коммутации (сопротивление Z_ϕ в каждой фазе равно нулю) и при работе со сколь угодно сложной нагрузкой. Для двухпульсной схемы ($m = 2$) справедливы неравенства

$$\left. \begin{aligned} u_d - e_1 &\geq 0; \quad u_d - e_2 \geq 0 \\ i_1 &\geq 0; \quad i_2 \geq 0. \end{aligned} \right\} \quad (7a)$$

и

Объединяя согласно (2) первые два неравенства в одно, получим

$$2u_d - e_1 - e_2 - |e_2 - e_1| \geq 0.$$

или

$$u_d - e_0 \geq 0, \quad (76)$$

где

$$e_0 = \frac{1}{2} (e_1 + e_2 + |e_1 - e_2|),$$

или в соответствии с (3а) в сокращенной записи

$$e_0 = e_1 \oplus e_2.$$

Исходя из того, что неравенства для токов $i_1 \geq 0$, $i_2 \geq 0$ эквивалентны неравенству $i_d \geq 0$ (поскольку $i_1 + i_2 = i_d$ и токи i_1 и i_2 не перекрываются), получаем два неравенства, эквивалентные исходным (7а):

$$u_d - e_0 \geq 0, \quad i_d \geq 0. \quad (7b)$$

Очевидно, неравенствам (7в) можно сопоставить эквивалентную однофазную схему (рис. 4, а), где э. д. с. e_0 определяется равенством (7б).

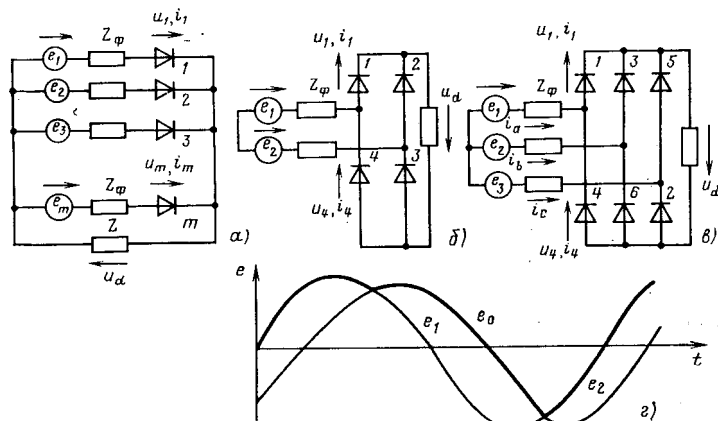


Рис. 3

Аналогично, для трехпульсной схемы (рис. 3, а, $m = 3$)

$$\left. \begin{aligned} u_d - e_1 &\geq 0; & u_d - e_2 &\geq 0; & u_d - e_3 &\geq 0; \\ i_1 &\geq 0; & i_2 &\geq 0; & i_3 &\geq 0. \end{aligned} \right\} \quad (7\Gamma)$$

После объединения первых двух неравенств имеем

$$2u_d - e_1 - e_2 - |e_2 - e_1| \geq 0,$$

а после замены полученного неравенства и удвоенного третьего неравенства (7Г) одним

$$\begin{aligned} 4u_d - e_1 - e_2 - 2e_3 - |e_2 - e_1| - \\ - |2e_3 - e_1 - e_2 - |e_2 - e_1|| \geq 0, \end{aligned}$$

или

$$u_d - e_0 \geq 0, \quad (7Д)$$

где

$$\begin{aligned} e_0 = \frac{1}{4} (e_1 + e_2 + 2e_3 + |e_1 - e_2| + \\ + |2e_3 - e_1 - e_2 - |e_2 - e_1||). \end{aligned}$$

В сокращенной записи

$$e_0 = e_1 \oplus e_2 \oplus e_3.$$

С учетом того, что

$$i_d \geq 0,$$

можем трехпульсную схему заменить однопульсной рис. 4, а, в которой э. д. с. e_0 находится из выражения (7Д).

Совершенно так же доказывается эквивалентность m -пульсной схемы рис. 3, а однопульсной схеме рис. 4, а, при этом $e_0 = e_1 \oplus e_2 \oplus \dots \oplus e_m$.

На рис. 3, г показаны э. д. с. e_1 и e_2 для случая двухпульсной схемы и э. д. с. e_0 (жирная линия) эквивалентной ей однопульсной схемы. В случае симметричных систем выражение для e_0 упрощаются, ток нагрузки i_d , как правило, больше нуля, т. е. непрерывен, и диод в схеме рис. 4, а может быть закорочен.

Переход от диодных схем преобразования к тиристорным может быть легко осуществлен с учетом того, что на интервалах действия функции запрета (рис. 1, функция $F = 1$) соответствующий тиристор отключен (ключ, включенный на рис. 1, а последовательно с диодом, разомкнут), и анализируется образованная на этом интервале диодная схема с меньшей пульсностью. Так, для трехпульсной управляемой схемы имеем:

$$e_{0\alpha} = e_{012}F_3 + e_{023}F_1 + e_{031}F_2 + e_0F, \quad (8а)$$

где e_{012} , e_{023} , e_{031} — эквивалентные напряжения двухпульсных схем, образуемых соответственно первым и вторым; вторым и третьим, третьим и первым диодами; e_0 — выходное напряжение трехпульсной неуправляемой схемы; $F = 1 - F_1 - F_2 - F_3$, F_i — коммутационная функция запрета i -го тиристора.

Если полагать, что $e_1 + e_2 + e_3 = 0$, выражение (8а) примет вид

$$\begin{aligned} e_{0\alpha} = e_3F_1 + e_1F_2 + e_2F_3 + \frac{1}{4}F(e_3 + |e_2 - e_1| + |3e_3 - \\ - |e_2 - e_1||). \end{aligned} \quad (8б)$$

Эквивалентная схема рис. 4, а остается справедливой и для этого случая [e_0 рис. 4, а заменяется на $e_{0\alpha}$ из (8а)].

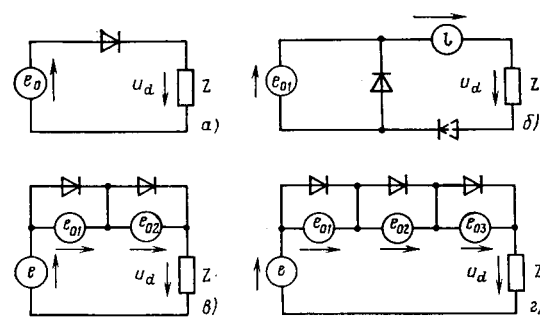


Рис. 4

С учетом того, что катодная группа однофазной мостовой схемы (рис. 3, б, вентили 1 и 4) образует двухпульсную лучевую схему, для потенциала ϕ_+ плюсового полюса на основании (7б) и (8а), полагая $1 - F_1 - F_2 = F$, имеем

$$\phi_+ - [e_1F_2 + e_2F_1 + (e_1 \oplus e_2)F] \geq 0, \quad (9а)$$

и аналогично для потенциала ϕ_- минусового полюса

$$-\phi_- + [e_1F_2 + e_2F_1 + (e_1 \ominus e_2)F] \geq 0. \quad (9б)$$

Очевидно, что выпрямленное напряжение однофазной мостовой схемы

$$u_d = \phi_+ - \phi_-,$$

т. е. в общем случае непрерывного или прерывистого режима ($e = e_1 - e_2$)

$$u_d - [e(F_2 - F_1) + e_1 \oplus e_2 F - (e_1 \ominus e_2)F] \geq 0. \quad (9в)$$

Это неравенство совместно с неравенством $i_d \geq 0$ позволяет заменить однофазную мостовую схему преобразованием эквивалентной схемой замещения рис. 4, а, где

$$e_{0\alpha} = e(F_2 - F_1) + (e_1 \oplus e_2)F - (e_1 \ominus e_2)F. \quad (9г)$$

Точно так же для потенциалов ϕ_+ и ϕ_- неуправляемой трехфазной мостовой схемы рис. 3, в получаем соответственно (приняв $e_1 + e_2 + e_3 = 0$)

$$\phi_+ = e_1 \ominus e_2 \oplus e_3 = \frac{1}{4}(e_3 + |e_2 - e_1| - |3e_3 - |e_2 - e_1||); \quad (10а)$$

$$\phi_- = e_1 \ominus e_2 \ominus e_3 = \frac{1}{4}(e_3 - |e_2 - e_1| - |3e_3 + |e_2 - e_1||). \quad (10б)$$

В итоге для выпрямленного напряжения можно записать

$$u_d - e_0 \geq 0,$$

где

$$\begin{aligned} e_0 = \frac{1}{4} |3e_3 + |e_2 - e_1|| - \frac{1}{4} |3e_3 - |e_2 - e_1|| + \\ + \frac{1}{2} |e_2 - e_1|; \end{aligned} \quad (10в)$$

для неуправляемого режима и при $\alpha \neq 0$

$$e_{0\alpha} = e_{12}F_2 + e_{13}F_3 + e_{23}F_4 + e_{21}F_5 + e_{32}F_6 + e_{31}F_1 + e_0F. \quad (10г)$$

Здесь e_{ij} — линейное напряжение на входе мостовой схемы; F_i — коммутационная функция запрета i -го тиристора; $F = 1 - F_1 - F_2 - F_3$.

В этом случае эквивалентная схема также соответствует рис. 4, а.

Рассмотрим m -пульсную лучевую схему рис. 3, а при $Z_\Phi = \omega L \neq 0$. Для этой схемы напряжения на вентильях при $m = 2$

$$-u_1 = u_d - e_1 + L \frac{di_1}{dt} \geq 0; \quad -u_2 = u_d - e_2 + L \frac{di_2}{dt} \geq 0 \quad (11a)$$

и токи

$$i_1 \geq 0, \quad i_2 \geq 0, \quad (11b)$$

причем $i_1 + i_2 = i_d$, $i_1 - i_2 = i_0$.

Вводя эквивалентную э. д. с. $\tilde{e}_i = e_i - L \frac{di}{dt}$ ($i = 1, 2$), учитывающую внутреннее падение напряжения, на основании правила (2) и (11a) получаем (7б), т. е.

$$2u_d - e_1 - e_2 + L \frac{di_d}{dt} - \left| e_2 - e_1 + L \frac{di_0}{dt} \right| \geq 0. \quad (11b)$$

С другой стороны, из рассмотрения контура $e_1 - L_1 - 1 - 2 - L_2 - e_2$ видно, что при $i_1 > 0$ и $i_2 = 0$

$$u_2 = -\left(e_2 - e_1 + L \frac{di_0}{dt} \right), \quad (12a)$$

при $i_1 = 0$, $i_2 > 0$

$$u_1 = \left(e_2 - e_1 + L \frac{di_0}{dt} \right), \quad (12b)$$

и при $i_1 > 0$, $i_2 > 0$

$$u_1 = u_2 = 0. \quad (12b)$$

Три выражения (12a)–(12b) можно представить в виде

$$-\left| e_2 - e_1 + L \frac{di_0}{dt} \right| \leq 0, \quad (12г)$$

а неравенствам (11б) эквивалентно неравенство

$$i_d - |i_0| \geq 0. \quad (12д)$$

Два последних выражения позволяют поставить им в соответствие некоторый диод, обратное напряжение на котором равно

$$-\left| e_2 - e_1 + L \frac{di_0}{dt} \right|, \text{ а ток } i_d - |i_0|, \text{ т. е.} \\ \left| e_2 - e_1 + L \frac{di_0}{dt} \right| \oplus (|i_0| - i_d) r = 0. \quad (12e)$$

С учетом введения этого диода можно противопоставить схеме рис. 3, а ($m = 2$)-эквивалентную (рис. 4, б), где, как следует из (11, в), (12г)

$$e_0 = \frac{1}{2} \left(e_1 + e_2 - L \frac{di_0}{dt} \right), \quad e_{01} = \frac{1}{2} \left| e_2 - e_1 + L \frac{di_0}{dt} \right|.$$

Таким образом, в случае наличия режима коммутации, т. е. одновременной работы двух вентилей, схема замещения содержит один диод, включенный параллельно некоторому источнику напряжения, равному

$\frac{1}{2} |\tilde{e}_2 - \tilde{e}_1| = \frac{1}{2} \left| e_2 - e_1 + L \frac{di_0}{dt} \right|$. Ранее для режима прерывистого тока была получена схема с последовательным диодом (рис. 4, а). При наличии обоих режимов эквивалентная схема должна содержать как последовательный, так и параллельно включенный диод (рис. 4, б).

Для трехпульсной лучевой схемы (рис. 3, $m = 3$) при $Z_\Phi = \omega L$ напряжения на вентильях

$$-u_1 = u_d - e_1 + L \frac{di_1}{dt},$$

$$-u_2 = u_d + e_2 + L \frac{di_2}{dt},$$

$$-u_3 = u_d - e_3 + L \frac{di_3}{dt}.$$

Вводя, как и в случае (11в), эквивалентную э. д. с. $\tilde{e}_i$, приходим к выводу о справедливости (7д) при замене всех e_i на $\tilde{e}_i$.

Поступая так же, как и в случае двухпульсной лучевой схемы, для контура $e_1 - L_1 - 1 - 2 - L_2 - e_2$ имеем:

$$|\tilde{e}_1 - \tilde{e}_2| \geq 0,$$

$$i_1 + i_2 - |i_1 - i_2| \geq 0.$$

Объединяя последние два неравенства, получаем

$$|\tilde{e}_1 - \tilde{e}_2| \oplus r (|i_1 - i_2| - i_1 - i_2) \geq 0. \quad (13a)$$

Аналогично для контура $\tilde{e}_2 - L_2 - 2 - 3 - L_3 - e_3$

$$|\tilde{e}_2 - \tilde{e}_3| \oplus r (|i_2 - i_3| - i_2 - i_3) \geq 0. \quad (13б)$$

Уравнения вида (7д) для неуправляемой схемы или (8а) для управляемой, а также неравенства (13а) и (13б), взятые совместно, позволяют записать систему трех уравнений относительно токов i_1 , i_2 , i_3 , описывающих электромагнитные процессы в трехпульсной лучевой схеме с учетом угла коммутации:

$$u_d = \tilde{e}_1 \oplus \tilde{e}_2 \oplus \tilde{e}_3;$$

$$|\tilde{e}_1 - \tilde{e}_2| \oplus r (|i_1 - i_2| - i_1 - i_2) = 0;$$

$$|\tilde{e}_2 - \tilde{e}_3| \oplus r (|i_2 - i_3| - i_2 - i_3) = 0.$$

Два последних уравнения системы представляют собой уравнения ВАХ некоторых диодов, напряжения на которых равны соответственно $|\tilde{e}_1 - \tilde{e}_2|$ и $|\tilde{e}_2 - \tilde{e}_3|$, а токи $i_1 + i_2 - |i_1 - i_2|$ и $i_2 + i_3 - |i_2 - i_3|$.

Это дает возможность представить эквивалентную схему замещения трехпульсной лучевой схемы в виде рис. 4, в. Схема содержит два шунтирующих диода, учитывающих коммутационный процесс.

Далее нетрудно получить систему уравнений для трехфазной мостовой схемы. Для этого при сохранении условия $e_1 + e_2 + e_3 = 0$ достаточно в формулах (10а)–(10г) вместо e_i подставить $\tilde{e}_i = e_i - L \frac{di_i}{dt}$. Таким образом, в случае неуправляемого выпрямителя

$$u_d = \frac{1}{4} |3\tilde{e}_3 + |\tilde{e}_2 - \tilde{e}_1|| - \frac{1}{4} |3\tilde{e}_3 - |\tilde{e}_2 - \tilde{e}_1|| + \\ + \frac{1}{2} |\tilde{e}_2 - \tilde{e}_1|. \quad (14a)$$

а управляемого

$$u_{dL} = \tilde{e}_{12} F_2 + \tilde{e}_{13} F_3 + \tilde{e}_{23} F_4 + \tilde{e}_{21} F_5 + \tilde{e}_{32} F_6 + \tilde{e}_{31} F_1 + u_d F. \quad (14б)$$

Уравнение (14а) или (14б), дополненное двумя уравнениями типа (13а) и (13б) для катодной группы вентилей и аналогичными уравнениями для анодной группы,

дает систему уравнений с учетом обозначений рис. 3 относительно токов плеч $i_1 - i_6$:

$$\left. \begin{aligned} u_d &= \tilde{e}_1 \oplus \tilde{e}_2 \oplus \tilde{e}_3 - \tilde{e}_1 \ominus \tilde{e}_2 \ominus \tilde{e}_3; \\ |\tilde{e}_1 - \tilde{e}_2| \oplus r(|i_1 - i_3| - i_1 - i_3) &= 0; \\ |\tilde{e}_2 - \tilde{e}_3| \oplus r(|i_3 - i_5| - i_3 - i_5) &= 0; \\ |\tilde{e}_1 - \tilde{e}_2| \oplus r(|i_4 - i_6| - i_4 - i_6) &= 0; \\ |\tilde{e}_2 - \tilde{e}_3| \oplus r(|i_6 - i_2| - i_6 - i_2) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

причем (рис. 3, в)

$$\left. \begin{aligned} u_d &= f(i_d); \\ i_1 + i_3 + i_5 &= i_2 + i_4 + i_6 = i_d; \\ i_a &= i_1 - i_4; \\ i_b &= i_3 - i_6; \\ i_c &= i_5 - i_2. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Схема замещения, которая соответствует полученной системе уравнений, содержит три диода и представлена на рис. 4, г.

Рассмотрим некоторые особенности анализа автономных однофазных мостовых инверторов.

Для однофазной мостовой схемы на базе формул (9г) и (11в) можно получить:

$$u_{d\alpha} = e(F_2 - F_1) + \left| e - L \frac{di_0}{dt} \right| F.$$

При мгновенной коммутации и непрерывном токе

$$u_{d\alpha} = e(F_2 - F_1) + |e| F.$$

Некоторые простейшие преобразования дают

$$u_{d\alpha} = -|e|(F_2 + F_1) + |e|F = |e|[1 - 2(F_1 + F_2)] = eF_0,$$

где F_0 — коммутационная функция, равная $(-1)^n$; n — номер коммутации.

Эти соотношения следуют непосредственно из схемы однофазного инвертора и подробно рассмотрены в [3]. Точно так же можно установить связь формул (10) и (15) при условии мгновенной коммутации с соотношениями, приведенными в [3], для трехфазного мостового инвертора.

Рассмотрим более подробно схемы замещения вентильных преобразователей для прерывистого режима (рис. 4, а) и для режима непрерывного тока с учетом угла коммутации (рис. 4, б, в, г).

Напряжения и токи в схеме рис. 4, а не изменятся, если диод заменить источником напряжения, равного обратному напряжению на этом диоде на интервалах его закрытого состояния, т. е. на интервалах паузы тока, и нулю — на интервалах проводимости (рис. 5, а).

Для этой схемы имеем

$$i(t) = \int_0^t [e(\tau) + u_v(\tau)] X(t - \tau) d\tau, \quad (17a)$$

где $X(t)$ — импульсная характеристика всей схемы преобразователя относительно тока $i(t)$.

Если рассматривается процесс инвертирования, то в (17а) $u_v(\tau)$ неизвестно ни по значению, ни по продолжительности, неизвестно также значение выходного напряжения на нагрузке Z , и процесс может быть опре-

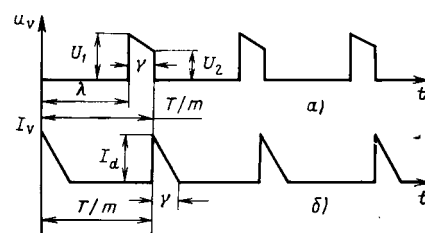


Рис. 5

делен в переходном режиме с помощью численного алгоритма [5]:

на первом после пуска проводящем интервале λ_0

$$i(t) = \int_0^t eX(t - \tau) d\tau; \quad (17б)$$

на первом интервале паузы

$$0 = \int_0^t eX(t - \tau) d\tau + \int_{\lambda_0}^t u_{v0}(\tau) X(t - \tau) d\tau; \quad (17в)$$

на втором проводящем интервале

$$i(t) = \int_0^t eX(t - \tau) d\tau + \int_{\lambda_0}^t u_{v0}(\tau) X(t - \tau) d\tau \quad (17г)$$

и т. д., причем u_{v0} определяется из (17в) и т. д.

Если рассматривается процесс выпрямления, то неизвестна только продолжительность ненулевого значения u_v , значение же его известно и равно, очевидно, $e - u_d$. Продолжительность этих интервалов определяется по моментам равенства тока i нулю обычно решением трансцендентных уравнений.

Установившийся режим инвертора, работающего в прерывистом режиме, определяется в следующем порядке: импульс напряжения u_v (рис. 5, а) аппроксимируется трапецией, далее выполняется разложение импульсного периодического напряжения u_v в ряд Фурье в функции продолжительности γ , амплитуды переднего фронта U_1 и заднего U_2 . Дальнейший анализ выполняется аналогично [4], что обеспечивает высокую точность и исключает необходимость допущений о синусоидальности выходного напряжения инвертора, синусоидальности формы импульсов входного тока и т. д. Установившийся режим выпрямителя определяется так же, неизвестной величиной является только длительность импульса напряжения u_v .

В схеме рис. 4, б, в, г параллельно включенный диод может быть заменен источником тока, равного току диода на интервале его открытого состояния, т. е. на интервале коммутации, и нулю на межкоммутационных интервалах (рис. 5, б).

При анализе схемы в переходном режиме порядок расчета идентичен расчету для прерывистого тока [формулы (17б) — (17г)]. В установившемся режиме импульс тока аппроксимируется треугольником с основанием, равным длительности коммутационного процесса γ и высотой I_d , что равносильно линеаризации тока на коммутационном интервале, как это сделано в [6]. Эти величины определяются в такой же последовательности, как и величины γ , U_1 , U_2 в случае прерывистого режима: разложением импульсного периодического тока i_v в ряд Фурье в функции γ и I_d и расчетом, анало-

гичным [4]. При этом исключается необходимость в допущении о сглаженности тока i_d , синусоидальности выходного напряжения инвертора и т. д.

Описание электромагнитных процессов в вентильных преобразователях с помощью приведенных выше нелинейных дифференциальных уравнений, учитывающих все режимы и интервалы работы вентильных схем, позволяет применить для анализа их устойчивости находящийся все большее распространение и развитие прямой метод Ляпунова [7]. Метод, как известно, дает возможность оценить также основные характеристики переходного процесса — его длительность и качество. Работы [8 и 9] распространяют классическую теорию метода Ляпунова на разрывные функции.

В качестве примера рассмотрим схему замещения выпрямителя рис. 2, б, работающего в прерывистом режиме на параллельное соединение резистора R и конденсатора C (рис. 2, в), при этом пусть (рис. 2, б) $R = 0$. Неизменность установившегося режима в зависимости от начальных условий, т. е. асимптотическая устойчивость в целом этой схемы, не является очевидной и требует доказательства [10].

Для указанной схемы систему дифференциальных уравнений можно записать в следующем виде:

$$L \frac{di}{dt} = \frac{1}{2} e + \frac{1}{2} \frac{|i|}{i} e - \frac{1}{2} u - \frac{1}{2} \frac{|i|}{i} u; C \frac{du}{dt} = -\frac{u}{R} + \frac{1}{2} i + \frac{1}{2} |i|. \quad (18)$$

Переход к возмущенному движению дает:

$$\left. \begin{aligned} L \frac{di}{dt} &= \frac{1}{2} \frac{|i_0 + i|}{i_0 + i} e - \frac{1}{2} \frac{|i_0|}{i_0} e - \frac{1}{2} u - \frac{1}{2} \frac{|i_0 + i|}{i_0 + i} u_0 + \\ &+ \frac{1}{2} \frac{|i_0|}{i_0} u - \frac{1}{2} \frac{|i_0 + i|}{i_0 + i} u = A; \\ C \frac{du}{dt} &= -\frac{u}{R} + \frac{1}{2} i + \frac{1}{2} |i_0 + i| - \frac{1}{2} |i_0| = B \end{aligned} \right\} \quad (18a)$$

Функцию Ляпунова для этого случая ищем в виде квадратичной формы:

$$V = \frac{Li^2 + Cu^2}{LC},$$

откуда

$$V' = \frac{2ii'}{C} + \frac{2uu'}{L}.$$

Запишем значение производной функции Ляпунова, определенной с учетом системы (18a):

$$V' = \frac{2iA}{LC} + \frac{2uB}{LC}.$$

Непосредственная проверка позволяет убедиться, что производная V' определено-отрицательная, т. е. процесс асимптотически устойчивый.

Выводы. 1. Представление уравнений, описывающих электромагнитные процессы в вентильных преобразователях в классе разрывных функций с применением модуль-функции, позволяет отразить нелинейный характер процессов в вентильных преобразователях вне зависимости от вида преобразования, режима работы, степени сложности нагрузки при минимуме исходных допущений и оговорок.

2. На базе уравнений с разрывными функциями различных вентильных преобразователей могут быть приведены в соответствие одинаковые схемы замещения, содержащие минимальное число нелинейных элементов — диодов.

3. Эквивалентные схемы замещения позволяют применить единый для выпрямителей и инверторов метод анализа переходных и установившихся режимов с учетом прерывистости входного тока, наличия угла коммутации при необязательности допущения синусоидальности выходного напряжения инверторов, сглаженности тока и т. д.

4. Описание электромагнитных процессов в вентильных преобразователях с помощью базирующихся на разрывных функциях нелинейных уравнений, учитывающих все режимы и интервалы работы схем, позволяет применить для анализа их устойчивости прямой метод Ляпунова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов Л. Л. К решению электротехнических и других технических задач с разрывными функциями и начала аналитической теории разрывных функций. — Диссертация на степень канд. техн. наук. М., 1963.
2. Чуа Л. О., Кан Сун Мо. Секционные кусочно-линейные функции. Канническое представление, свойства и приложения. — ТИИЭР, 1977, № 6, т. 65.
3. Беркович Е. И. Исследование пусковых режимов автономных инверторов. Диссертация на степень канд. техн. наук. М.: 1974.
4. Иванов Л. Л., Беркович Е. И. О методе гармонических составляющих для анализа однофазных автономных инверторов. — ЭП. Преобразовательная техника, 1974, вып. 7.
5. Ивенский Г. В., Ким Ен Дар. Расчет переходных процессов в однофазных автономных инверторах. — Вопросы преобразовательной техники и частотного электропривода. — Саратов, 1980.
6. Глинтерник С. Р. Электромагнитные процессы и режимы мощных статистических преобразователей. — М.: Наука, 1969.
7. Малкин И. Г. Теория устойчивости движения. — М.: Наука, 1966.
8. Айзерман М. А., Гантмахер Ф. Р. Некоторые вопросы теории нелинейных систем автоматического регулирования с разрывными характеристиками. — 1-ый Международный конгресс ИФАК по автоматическому управлению. — М.: 1960.
9. Филиппов А. Ф. Приложение теории дифференциальных уравнений разрывной правой частью к нелинейным задачам автоматического регулирования. — М., 1960.
10. Данилов Л. В. Электрические цепи с нелинейными R -элементами. — М.: Связь, 1974.

Определение оптимальных параметров коммутирующих контуров устройств принудительного выключения тиристоров

ОСТЕРОВ В. М., канд. техн. наук
Одесса

Устройства принудительного выключения тиристоров с трансформаторной либо дроссельной связью между цепями рабочего и коммутирующего тиристоров находят широкое применение, например, в импульсных усилителях мощности электроприводов с широтно-импульсными преобразователями. Выключение рабочего тиристора в этих устройствах осуществляется подключением предварительно заряженного конденсатора параллельно реактору, соединенному последовательно с выключаемым тиристором. Такие устройства относятся к группе устройств последовательной коммутации; они обеспечивают на нагрузке импульс напряжения сколь угодно малой длительности. При работе этих устройств в широтно-импульсных преобразователях с постоянной частотой коммутации достигается неограниченный диапазон регулирования среднего напряжения на нагрузке в интервале одного такта коммутации.

Показатели устройства выключения характеризуются коммутационной способностью, под которой понимается значение того наибольшего тока в нагрузочной цепи $I_{\max}$ с источником напряжения U_p , который устройство способно отключить. Коммутационная способность рассматриваемых устройств, пропорциональная амплитуде напряжения на коммутирующем конденсаторе $U_c[n]$, растет с увеличением тока нагрузки. Характер изменения $U_c[n]$ под влиянием тока нагрузки определяется конкретным выполнением схемы устройства.

При определенных параметрах устройства режим работы выбирается так, чтобы последовательно выполнялись условия выключения рабочих тиристоров от такта к такту в наиболее тяжелых режимах работы преобразователя. Если устройства выключения используются в импульсных усилителях мощности реверсивных электроприводов, то таким режимом является реверс с максимальной скорости на максимальную. В этом режиме коммутируются наибольшие токи, а приращение тока от такта к такту имеет наибольшее значение.

В статье исследуются соотношения между собственной частотой $\omega_k = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{r_1}{4L^2}}$ и характеристическим сопротивлением $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ коммутирующего контура устройств выключения тиристоров, рассчитанных для работы в импульсных усилителях мощности быстродействующих электроприводов, отличающихся высокой кратностью тока в динамических режимах по отношению к номинальному току.

В приводах с маломинерционными и высокомоментными двигателями предельные значения токов в 8—10 раз превышают номинальное, поэтому режим работы устройств выключения тиристоров при номинальном токе нагрузки по существу не отличается от режима холостого хода. Под оптимальными параметрами коммутирующего контура будем понимать такие значения ω_k и ρ , которые соответствуют минимальным потерям на коммутацию в длительном режиме. Минимальными потерями на коммутацию обладают устройства выключения, у которых коммутационная способность на всех

тактах коммутации превышает необходимую, а по крайней мере в одном такте равна необходимой. Этот такт назовем критическим, так как условия коммутации тока нагрузки в этом такте определяют параметры устройства коммутации и режим работы, т. е. потери коммутирующего устройства. В токовой диаграмме быстродействующего электропривода, как правило, первый такт коммутации является критическим. Если критическим тактом является не первый, то, пересчитывая $U_c[n]$ к $U_c[n-1]$ и т. д., нетрудно определить значения тока I_1 , коммутацию которого должно обеспечить устройство из состояния холостого хода, чтобы условия коммутации критического такта были выполнены.

Определим оптимальные значения собственной частоты коммутирующего контура ω_k и характеристического сопротивления $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ для случая, когда значение наибольшего среднего напряжения импульсного усилителя мощности с широтно-импульсной модуляцией не зависит от периода собственной частоты коммутирующего контура.

Основное уравнение, определяющее выполнение условий коммутации для этого случая, имеет вид:

$$U_p \leq U_c[0] \cos \omega_k t_b - I_1 \rho \sin \omega_k t_b e^{-\frac{\omega_k}{2Q} t_b}. \quad (1)$$

Для контуров с $Q=12-20$ это условие может быть записано в виде:

$$U_p \leq U_c[0] \cos \omega_k t_b - I_1 \rho \sin \omega_k t_b, \quad (2)$$

где t_b — время восстановления тиристора (по паспортным данным).

Выразим потери в приведенном сопротивлении коммутирующего контура $r_{пр}$ в течение одного такта коммутации через $U_c[0]$ и ρ :

$$P = r_{пр} \int_0^{\frac{T_k}{2}} i^2(t) dt. \quad (3)$$

Допускаем, что длительность протекания тока в контуре не зависит от добротности, т. е. $\omega_k = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

Форма тока коммутирующего контура при работе в холостую имеет вид синусоидальной полуволны. Тогда учитывая, что форма тока в контуре синусоидальна, выражение (3) примет вид:

$$P = r_{пр} \int_0^{\frac{T_k}{2}} I_{\max}^2 \sin^2 \omega_k t dt = \frac{\pi}{2Q} \frac{U_c^2[0]}{\rho \omega_k}. \quad (4)$$

Из (2)

$$U_c^2[0] = \frac{U_p^2}{\cos^2 \omega_k t_b} + \frac{I_1^2 \rho^2 \sin^2 \omega_k t_b}{\cos^2 \omega_k t_b} + \frac{2U_p I_1 \rho}{\cos^2 \omega_k t_b} \times \sin \omega_k t_b, \quad (5)$$

тогда

$$P = \frac{\pi}{2Q} \left(\frac{U_p^2}{\rho \omega_K \cos^2 \omega_K t_B} + \frac{I_1^2 \rho \sin^2 \omega_K t_B}{\omega_K \cos^2 \omega_K t_B} + \frac{2U_p I_1 \sin \omega_K t_B}{\omega_K \cos^2 \omega_K t_B} \right). \quad (6)$$

Исследуем функцию (6) для определения значения ω_K и ρ , соответствующих ее минимуму

$$\frac{\partial P}{\partial \rho} = \frac{\pi}{2Q} \left[-\frac{U_p^2}{\rho^2 \omega_K \cos^2 \omega_K t_B} + \frac{I_1^2 \sin^2 \omega_K t_B}{\omega_K \cos^2 \omega_K t_B} \right]. \quad (7)$$

Из $\frac{\partial P}{\partial \rho} = 0$ следует:

$$\rho = \frac{U_p}{I_1} \frac{1}{\sin \omega_K t_B}; \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial \omega_K} = \frac{\pi}{2Q} & \left[\frac{U_p^2 (-\cos \omega_K t_B + 2\omega_K t_B \sin \omega_K t_B)}{\rho \omega_K^2 \cos^3 \omega_K t_B} + \right. \\ & + I_1 \rho \frac{2\omega_K t_B \sin \omega_K t_B - \sin^2 \omega_K t_B \cos \omega_K t_B}{\omega_K^2 \cos^3 \omega_K t_B} + \\ & \left. + 2U_p I_1 \frac{\omega_K t_B + \omega_K t_B \sin^2 \omega_K t_B - \sin \omega_K t_B \cos \omega_K t_B}{\omega_K^2 \cos^3 \omega_K t_B} \right]. \quad (9) \end{aligned}$$

Приняв $\frac{\partial P}{\partial \omega_K} = 0$, решим совместно (8) и (9), что приведет к уравнению:

$$\omega_K t_B + \omega_K t_B \sin^2 \omega_K t_B = \sin \omega_K t_B \cos \omega_K t_B. \quad (10)$$

Решение уравнения при $\omega_K t_B \leq \pi/4$ дает $\omega_K = 0$, тогда по (8) $\rho = \infty$. Так как при $\rho = \infty$ и $\omega_K = 0$ функция $P = f(\omega_K, \rho)$ не имеет определенного конечного вещественного значения, то будут не определены и значения $\frac{\partial^2 P}{\partial \rho^2}$, $\frac{\partial^2 P}{\partial \omega_K^2}$, $\frac{\partial^2 P}{\partial \rho \partial \omega_K}$, следовательно, функция $P = f(\omega_K, \rho)$

не имеет экстремумов в области $0 < \rho < \infty$, $0 < \omega_K < \infty$. Учитывая это, определим наибольшие и наименьшие значения функции $P = f(\omega_K, \rho)$ при реальных ограничениях, накладываемых на выбор величин ρ и ω_K . Максимальное значение характеристического сопротивления может быть определено из условия обеспечения роста напряжения на конденсаторе до предельно допустимого значения при коммутации максимального тока. Тогда минимальное значение собственной частоты коммутирующего контура

$$\omega_{K \min} = \frac{1}{t_B} \arcsin \frac{U_p}{I_1 \rho_{\max}}. \quad (11)$$

Максимальное значение собственной частоты коммутирующего контура определяется конкретными динамическими свойствами используемых тиристоров (временем включения, временем восстановления, предельными значениями di/dt и dU/dt) и имеет конечное значение $\omega_{K \max}$, которое определит минимальное значение ρ :

$$\rho_{\min} = \frac{U_p}{I_1 \sin \omega_{K \max} t_B}. \quad (12)$$

Подставив в (6) выражение для ρ из (12), получим зависимость:

$$P = f(\omega_K) = \frac{\pi}{2Q} U_p I_1 \frac{\sin \omega_K t_B}{\omega_K \cos^2 \omega_K t_B}. \quad (13)$$

Из сравнения значений функций $P = f(\omega_K)$ при собственной частоте коммутирующего контура $\omega_{K \max}$ и $\omega_{K \min}$ видно, что $P(\omega_{K \max}) > P(\omega_{K \min})$, т. е.

$$\frac{\sin \omega_{K \max} t_B}{\omega_{K \max} \cos^2 \omega_{K \max} t_B} > \frac{\sin \omega_{K \min} t_B}{\omega_{K \min} \cos^2 \omega_{K \min} t_B},$$

поскольку

$$\frac{\sin x_{\max}}{x_{\max} \cos^2 x_{\max}} > \frac{\sin x_{\min}}{x_{\min} \cos^2 x_{\min}}.$$

Таким образом, если не учитывать влияния собственной частоты коммутирующего контура на величину наибольшего среднего значения напряжения на нагрузке, то минимальные потери обеспечит устройство с наименьшим значением ω_K .

Ниже приведены значения функции $\frac{\sin x}{x \cos^2 x}$ для $0 < x < \pi/2$, т. е. для реально осуществимых значений $\omega_K t_B$

x	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,75
$\frac{\sin x}{x \cos^2 x}$	1	1,01	1,035	1,095	1,16	1,24	1,38	1,59	1,71

Анализируя (13), можно сделать вывод, что повышение частоты коммутации f , приводящее к уменьшению I_1 , может не сопровождаться увеличением суммарных потерь при работе устройства вхолостую.

Найдем оптимальные значения ω и ρ с учетом изменения максимального среднего напряжения на нагрузке в зависимости от периода собственных колебаний коммутирующего контура.

Номинальное напряжение, соответствующее максимальной скважности, может быть выражено через период коммутации нагрузки T и собственную частоту коммутирующего контура ω_K :

$$U_H = U_p \frac{T - \frac{\pi}{\omega_K}}{T}. \quad (14)$$

Выразим из (14) U_p и подставим его значение в (2), тогда уравнение, выражающее условие коммутации первого такта будет иметь вид:

$$U_H \frac{\omega_K T}{\omega_K T - \pi} = U_c [0] \cos \omega_K t_B - I_1 \rho \sin \omega_K t_B, \quad (15)$$

отсюда

$$U_c [0] = \frac{U_H \omega_K T}{\cos \omega_K t_B (\omega_K T - \pi)} + I_1 \rho \frac{\sin \omega_K t_B}{\cos \omega_K t_B}. \quad (16)$$

Возводя (16) в квадрат и подставляя его в выражение для потерь (4), получаем:

$$P = \frac{\pi}{2Q} \left[\frac{U_H^2 \omega_K^2 T^2}{\rho \cos^2 \omega_K t_B (\omega_K T - \pi)^2} + \frac{I_1 \rho \sin^2 \omega_K t_B}{\omega_K \cos^2 \omega_K t_B} + \frac{2U_H I_1 T \sin \omega_K t_B}{\cos^2 \omega_K t_B (\omega_K T - \pi)^2} \right]. \quad (17)$$

Найдем ω_K и ρ , соответствующие минимуму функции (17):

$$\frac{\partial P}{\partial \rho} = \frac{\pi}{2Q} \left[-\frac{U_H^2 \omega_K T^2}{\rho^2 \cos^2 \omega_K t_B (\omega_K T - \pi)^2} + \right.$$

$$\left. + \frac{I_1^2 \sin^2 \omega_K t_B}{\omega_K \cos^2 \omega_K t_B} \right] .$$

Из $\frac{\partial P}{\partial \rho} = 0$ получим:

$$\rho = \frac{U_H}{I_1} \frac{\omega_K T}{\sin \omega_K t_B (\omega_K T - \pi)} ; \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial \omega_K} = \frac{\pi}{2Q} \left\{ \frac{U_H^2 T^2}{\rho} \times \right. \\ \times \left[\frac{-\cos \omega_K t_B (\omega_K T + \pi) + 2\omega_K t_B (\omega_K T - \pi) \sin \omega_K t_B}{\cos^3 \omega_K t_B (\omega_K T - \pi)^3} \right] + \\ + 2U_H T I_1 \times \\ \times \left[\frac{(t_B (\omega_K T - \pi) + t_B (\omega_K T - \pi) \sin^2 \omega_K t_B - T \sin \omega_K t_B \cos \omega_K t_B)}{(\omega_K T - \pi)^2 \cos^3 \omega_K t_B} \right] + \\ \left. + I_1^2 \rho \left(\frac{2\omega_K t_B \sin \omega_K t_B - \sin^2 \omega_K t_B \cos \omega_K t_B}{\omega_K^2 \cos^3 \omega_K t_B} \right) \right\}. \quad (19) \end{aligned}$$

Подставив в (19) значение ρ из (18), приходим к трансцендентному уравнению относительно ω_K :

$$-T \sin \omega_K t_B \cos \omega_K t_B - t_B (\omega_K T - \pi) \sin^2 \omega_K t_B + \\ + t_B (\omega_K T - \pi) = 0. \quad (20)$$

Если в (20) принять $\omega_K t_B = x$, $\frac{T}{t_B} = A$, то получим:

$$A \sin x \cos x + (Ax - \pi) \sin^2 x + (Ax - \pi) = 0. \quad (21)$$

Последнее уравнение также является трансцендентным и может быть решено для принятых значений A методом последовательных приближений. В таблице приведены результаты решения уравнения (21) для нескольких значений A .

Для оценки того, действительно ли анализируемая функция имеет минимум при найденных значениях x , определим знаки функций:

$$\Delta = f''_{\rho, \rho} f''_{\omega_K, \omega_K} - (f'_{\rho, \omega_K})^2 \text{ и } f'_{\rho, \rho}.$$

$$\text{Функция } \frac{\partial^2 P}{\partial \rho^2} = \frac{\pi}{Q} \frac{I_1^3 \sin^3 \omega_K t_B}{U_H \omega_K^2 T \cos^2 \omega_K t_B} > 0,$$

так как все сомножители, входящие в нее, положительны.

Определив $\frac{\partial^2 P}{\partial \omega_K^2}$, $\frac{\partial^2 P}{\partial \omega_K \partial \rho}$ и осуществив подстановку

$\omega_K t_B = x$, $\omega_K T = Ax$ в полученные выражения, получим

$$\begin{aligned} \Delta := \frac{\partial^2 P}{\partial \omega_K^2} \frac{\partial^2 P}{\partial \rho^2} - \left[\frac{\partial^2 P}{\partial \omega_K \partial \rho} \right]^2 ; \\ \Delta = \frac{\pi^2 I_1^4}{Q^2 \omega_K^4 \cos^6 x (Ax - \pi)^2} [(4A^2 x^2 - \pi) \sin^4 x \times \\ \times \cos^2 x + 2x^2 (Ax - \pi) \sin^4 x - 2Ax^2 \sin^3 \cos x - \\ - 6Ax^2 (Ax - \pi) \sin^5 x \cos x - 2x (Ax - \pi) (Ax + \\ + \pi) \sin^3 x \cos^3 x - x^2 (Ax - \pi) \sin^2 x \cos^4 x]. \quad (22) \end{aligned}$$

Знак функции Δ будет определяться знаком сомножителя, стоящего в квадратных скобках выражения (22). Значения этого сомножителя, обозначенного буквой B , для уже определенных значений A и x приведены в таблице.

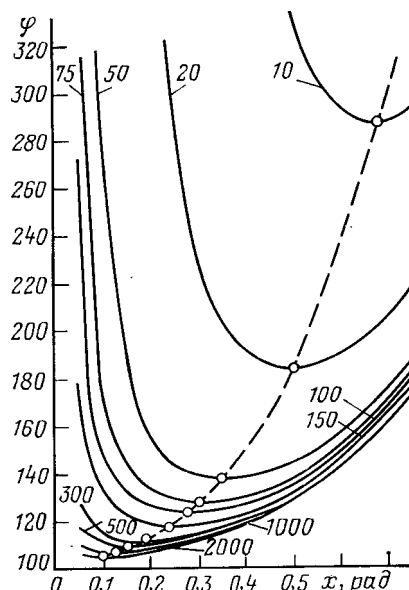
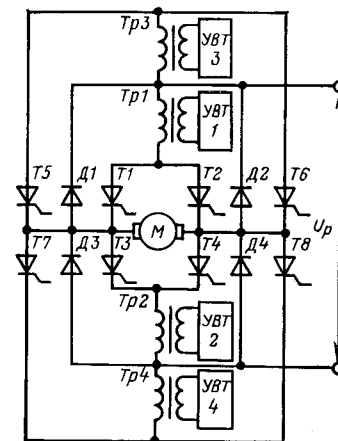


Рис. 1. Зависимости $\varphi_{отн} = f(x)$ для ряда значений T/t_B

Рис. 2. Двухмостовой тиристорный импульсный усилитель мощности



Как видно, знак сомножителя B при всех возможных значениях x положителен. Следовательно, при найденных значениях x функция $P = f(\rho, \omega_K)$ имеет минимум. Действительно, нетрудно привести функцию (4) к виду:

$$P = \frac{2\pi}{Q} U_H I_1 T \frac{\sin \omega_K t_B}{(\omega_K T - \pi) \cos^2 \omega_K t_B}$$

и вычислить значения $\varphi = \frac{\sin \omega_K t_B}{(\omega_K T - \pi) \cos^2 \omega_K t_B}$ при различных значениях A и x . Считаем, что величины U_H , I_1 , T и Q заданы и неизменны. Графики $\varphi_{отн} = f(x)$ для указанных значений T/t_B построены на рис. 1. Из них видно, что $P = f(\omega_K, \rho)$ при оптимальном значении ρ может изменяться в 2—2,5 раза в зависимости от выбора значения ω_K . Еще в большей степени потери зависят от выбора значения ρ . Исследование этой зависимости можно провести только для конкретных значений A . Нагляднее проделать это для мощности потерь одного такта, т. е. для функции $N = P/T$:

$$\begin{aligned} N = \frac{\pi}{2Q} \left[\frac{U_H^2 A x}{\rho \cos x (Ax - \pi)^2} + \frac{I_1^2 \sin x}{Ax \cos^2 x} \rho + \right. \\ \left. + \frac{2U_H I_1 \sin x}{\cos^2 x (Ax - \pi)} \right] = \frac{\pi}{2Q} \left[B_1 \frac{U_H^2}{\rho} + B_2 I_1^2 \rho + \right. \\ \left. + 2B_3 U_H I_1 \right]. \quad (23) \end{aligned}$$

Значения коэффициентов B_1 , B_2 , B_3 (см. таблицу) вычисляются для конкретных значений x , соответствующих решению трансцендентного уравнения (21).

Функция $N=f(\rho)$ состоит из трех составляющих: обратно пропорциональной ρ , прямо пропорциональной ρ и независимой от ρ . Исследования показали, что для каждого конкретного вида нагрузки в случае, когда рабочее напряжение зависит от собственной частоты коммутирующего контура, имеются значения ρ и ω_K , соответствующие устройству выключения тиристорov с минимальными потерями на холостом ходу. В случае, если значения собственной частоты коммутирующего контура не влияют на рабочее напряжение, минимуму потерь соответствуют устройства с наименьшим значением собственной частоты коммутирующего контура.

Результаты исследования устройств выключения тиристорov на минимум потерь показывают, что одной из наиболее эффективных мер по снижению потерь при работе устройства в электроприводах с малоинерционными двигателями является уменьшение собственной частоты коммутирующего контура. Однако снижение коэффициента использования рабочего напряжения не позволяет реализовать этот метод в преобразователях с поочередной коммутацией. Вместе с тем путем некоторого усложнения схемы импульсного усилителя мощности можно понизить в 10—15 раз собственную частоту коммутирующего контура. Принцип управления тиристорами¹ в таком преобразователе состоит в том, что якорь двигателя включен в общую диагональ двух тиристорных и одного диодного мостов (рис. 2).

Напряжение источника U_p прикладывается к якорю двигателя при одном направлении вращения через тиристоры $T1, T5, T4, T8$, а при другом направлении вращения — через тиристоры $T2, T6, T3, T7$. Диоды $D1—D4$, образующие обратный диодный мост, обеспечивают непрерывность тока во времени. На рис. 2 УВТ1-УВТ4 — устройства выключения тиристорov с трансформаторной связью, причем УВТ1 выключает тиристоры $T1$ и $T2$, а УВТ2 — $T3, T4$, УВТ3 — $T5, T6$, УВТ4 — $T7, T8$.

На рис. 3 представлены импульсы напряжения на якоре двигателя при его работе в двигательном режиме. В момент времени t_0 импульсами управления одновременно включаются тиристоры $T1$ и $T4$ и образуют

$A = T/t_B$	α , рад	B	B_1	B_2	B_3
2000	0,098	364	196,8	0,0005	0,0005
1000	0,126	247	126	0,0010	0,0010
500	0,157	106	78,6	0,0020	0,0021
300	0,188	66,3	56,2	0,0034	0,0036
150	0,238	50,6	35,7	0,0070	0,0076
100	0,247	41,7	27,5	0,0106	0,0120
75	0,304	31,5	22,9	0,0144	0,0161
50	0,352	16,0	17,7	0,0222	0,0270
20	0,499	—	10,3	0,0621	0,0907
10	0,666	8,54	7,4	0,1500	0,2840
5	0,923	5,16	7	0,4740	0,4863

следующую цепь для протекания тока якоря: источник питания, обмотка импульсного трансформатора $Tr1$, тиристор $T1$, якорь M , тиристор $T4$, обмотка трансформатора $Tr2$. Указанная цепь существует до момента отключения тиристора $T1$, при этом ток замыкается по цепи: $M—T4—$ обмотка $Tr2—D3$. Затем опять создается цепь тока от источника питания к якору через тиристоры $T4$ и $T5$. В момент выключения тиристора $T4$ ток якоря замыкается по цепи: $M—D2—$ обмотка $Tr3—$ тиристор $T5$. В следующий такт цепь якорного тока от источника создается тиристорами $T5, T8$, затем $T8$ и $T1$ и т. д. При вращении двигателя в другую сторону включаются тиристоры $T2, T3, T6$ и $T7$, причем порядок их включения и выключения аналогичен последовательности работы тиристорov $T1, T4, T5$ и $T8$.

В описанном преобразователе скажность напряжения на нагрузке может изменяться от нуля до 1 и иметь значения, как угодно близкие к нулевому. На рис. 3 приведены диаграммы работы тиристорov при двух значениях скажности напряжения на нагрузке. Видно, что частота импульсов напряжения на нагрузке при таком способе управления в 4 раза выше частоты работы тиристорov. Минимальный интервал времени, в течение которого рабочие тиристоры находятся в отключенном состоянии, равен двум периодам коммутации цепи нагрузки. Следовательно, полупериод собственной частоты колебательных контуров устройств выключения может достигать значений $2T$.

¹ А. с. 299917 (СССР). Способ управления тиристорами преобразователя/ Гольц М. Е., Гудзенко А. Б., Остреров В. М., Шпиглер Л. А. — Бюлл. изобр., 1971, № 12.

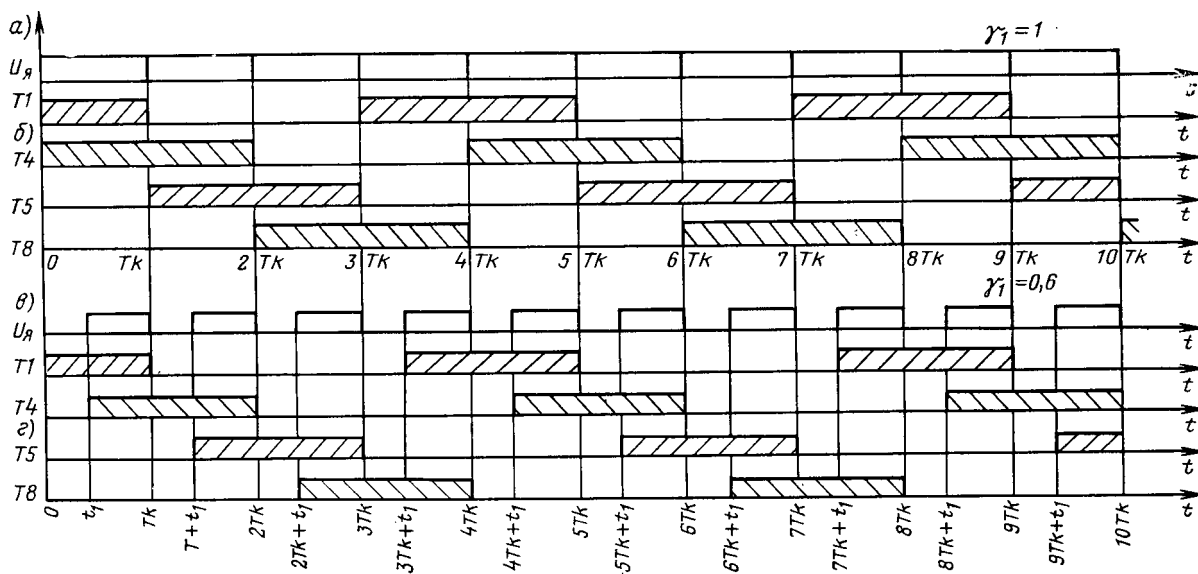


Рис. 3. Временные диаграммы работы элементов двухмостового усилителя мощности при двух значениях скажности γ напряжения на якоре:

a, b — импульсы выходного напряжения скажностью 1, 0,6, 0,2; δ, ϵ — интервалы работы тиристорov двухмостового усилителя при скажности импульсов выходного напряжения 1, 0,6

Отмеченные свойства описанного способа управления тиристорами мостового преобразователя позволяют повысить частоту коммутации нагрузки и соответственно уменьшить значение I_1 , а также существенно уменьшить

собственную частоту коммутирующих контуров, что дает возможность построить импульсный усилитель мощности с минимальными потерями.

[31.07.81]



УДК 621.319.4.001.24

Определение формы электродов конденсатора с постоянной напряженностью на краевых участках

АМРОМИН Э. Л., НОВГОРОДЦЕВ А. Б., кандидаты техн. наук
Ленинград

Задача повышения электрической прочности высоковольтных конструкций включает в себя ограничение максимальной напряженности электрического поля, достигаемой, как правило, на краевых участках поверхности электродов. Значительное количество попыток подхода к рациональному выбору формы краевого участка на базе расчета электрического поля основано на рассмотрении эквипотенциалей какой-либо модельной системы, допускающей сравнительно простой аналитический расчет. Наиболее известным среди подобных работ является решение Роговского [1] для конденсатора, в котором выбор формы краевого участка обеспечивает монотонное уменьшение напряженности вдоль его поверхности. Однако такой подход не позволяет получить форму электрода с минимальными габаритами, так как распределение напряженности на эквипотенциали модельного поля, по существу, не поддается целенаправленному регулированию. Попытки обобщить результат Роговского на наиболее часто используемые электроды с осевой симметрией, как правило, не имеют достаточного обоснования в виде строгого расчета осесимметричного поля.

Уменьшения габаритных размеров электрода можно добиться, подбирая его конфигурацию так, чтобы во всех точках поверхности напряженность поля была постоянной. Для систем с плоскопараллельным полем к такому решению ведет применение «годографического» метода, основанного на применении функций комплексного переменного. Этот подход для решения электротехнических задач впервые использован Н. Фелиси [2]. В указанной статье, в частности, определена форма электродов высоковольтного конденсатора с электродами бесконечной ширины, для которых требование постоянства напряженности накладывалось на всей длине обращенных друг к другу поверхностей электродов. В этом случае решение существует лишь при условии равенства толщины электрода d половине межэлектродного промежутка h , а скругленный участок имеет бесконечную протяженность.

Более сложная задача выбора формы краевых участков осесимметричных электродов, наиболее широко применяемых на практике, из условия постоянства напряженности на их поверхности не получила разрешения. В статьях [3—5], посвященных исследованию однородности поля в осесимметричном разрядном промежутке при различных формах краевой зоны, выполнен лишь сравнительный анализ различных систем с фиксированной геометрией и отсутствует целенаправленный подход

к выбору формы электродов исходя из требуемого характера распределения напряженности на их поверхности.

В настоящей статье изложен общий метод решения подобной обратной задачи и приведены результаты для конденсатора с обкладками в форме дисков толщиной d (рис. 1). Участки поверхностей обкладок AB и CD — плоские. Форма краевого участка BC — свободной части поверхности s заранее неизвестна и подлежит определению. В качестве критерия для выбора этой формы, как и в [2], используется условие постоянства модуля напряженности на участке BC .

Результат такого решения обеспечивает минимальный габаритный радиальный размер конденсатора R'' при заданном значении максимальной напряженности на поверхности обкладок, напряжения между обкладками и фиксированных размеров R , d и h . Это способствует повышению электрической прочности устройства при заданных его габаритах. Более строгий подход к задаче повышения электрической прочности требует учета ее статистического характера и более широкого круга факторов, в частности, влияния площади участка с максимальной напряженностью и закона распределения напряженности вблизи поверхности электродов. Однако определение формы электродов при такой расширенной постановке значительно усложняется.

Наряду с осесимметричной задачей в рамках принятой постановки рассматривается также и соответствующая плоская задача. Здесь, в отличие от [2], получено более общее решение, пригодное для конечных размеров скругляемого участка и произвольного значения относительной толщины электродов.

Метод решения задачи с осевой симметрией. В своей математической формулировке поставленная задача о выборе формы электрода с постоянной напряженностью на участке BC идентична задаче гидродинамики об определении формы струи идеальной жидкости, сходящей с твердой преграды. Поэтому для решения воспользуемся видоизмененным методом численного решения гидродинамической задачи с осевой симметрией [6, 7].

Сущность метода состоит в применении последовательных приближений, предусматривающих целенаправленную деформацию свободной части поверхности s (рис. 1), пока на этой части не будет достигнуто с заданной точностью условие постоянства плотности заряда:

$$\sigma = \sigma_0 = \text{const.} \quad (1)$$

При этом решение задачи о распределении заряда на заданной поверхности s проводника произвольной формы

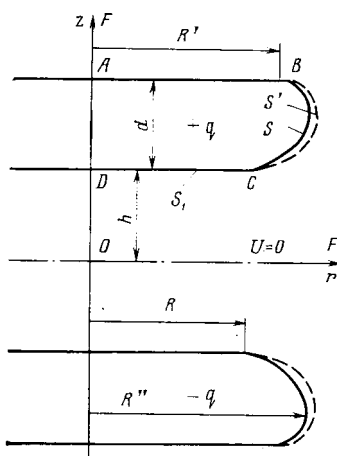


Рис. 1. Осевое сечение конденсатора

ищется в виде потенциала простого слоя U , распределенного по поверхности s . Так как внутри проводника поле отсутствует, то с внутренней стороны поверхности s имеем условие $\partial U / \partial n = 0$, приводящее к интегральному уравнению Робена относительно плотности зарядов σ , распределенных на s [8]:

$$\sigma + \frac{1}{2\pi} \int_s \sigma \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{\rho} \right) ds = 0. \quad (2)$$

При деформации поверхности изменяется распределение заряда на ней, а следовательно и производные потенциала, и условие (2) станет нелинейным, так как оно будет включать в себя произведение заранее неизвестных плотности σ и компонент вектора $\vec{n}$. Поэтому рассматриваемая задача в целом нелинейна, и ее решение, следуя [6, 7], ищется на каждом приближении в виде двух этапов.

На первом этапе решается прямая задача — определяется распределение заряда по известной поверхности s из линейного уравнения (2) при дополнительном условии

$$\int_{s_1} \sigma ds = q, \quad (3)$$

где q — полный заряд обкладки; s_1 — ее поверхность.

При этом учитывается нечетная симметрия распределения зарядов на обкладках конденсатора: интегрирование во всех формулах, кроме (3), проводится по полной поверхности s , включающей в себя как положительно, так и отрицательно заряженную обкладки.

В первом приближении s задается с определенной степенью произвола. На последующих приближениях она является результатом корректировки, осуществленной на втором этапе предыдущего приближения.

Второй этап предусматривает решение обратной задачи и состоит в решении нелинейного уравнения (2) и дополнительного условия

$$\frac{\partial U}{\partial t} = 0, \quad (4)$$

где t — касательная к поверхности, составленных для искомой поверхности s' . Искомыми при этом являются как плотность заряда σ' , так и компоненты нормали n' . Предположение о малости деформаций поверхности s по сравнению с характерными размерами электродов позволяет осуществить линеаризацию уравнений (2) и

(4). Эта линеаризация осуществляется следующим образом. При малых деформациях малы отличия значений плотности заряда $\Delta\sigma$ в сопоставляемых точках исходной s и деформируемой s' поверхностей:

$$\Delta\sigma = \sigma' - \sigma, \quad (5)$$

и мало будут отличаться компоненты нормалей в сопоставляемых точках. Тогда, пренебрегая в (2) и (4) произведениями малых величин, формально возможно удовлетворить обоим этим условиям на s' , располагая дополнительные заряды $\Delta\sigma$ на исходной недеформированной поверхности s .

Линеаризация производных осуществляется следующим образом:

$$\frac{\partial U'}{\partial n'} = \frac{\partial U'}{\partial x} (n_x + \Delta n_x) + \frac{\partial U'}{\partial y} (n_y + \Delta n_y), \quad (6)$$

где $U' = U + \Delta U$ — потенциал поля зарядов $\sigma + \Delta\sigma$ на поверхности s' .

Пренебрегая произведениями малых величин, перепишем первое слагаемое (6):

$$\frac{\partial U'}{\partial x} (n_x + \Delta n_x) = \frac{\partial U}{\partial x} n_x + \frac{\partial \Delta U}{\partial x} n_x + \frac{\partial U}{\partial x} \Delta n_x + \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial n} h n_x, \quad (7)$$

где h — расстояние по нормали между поверхностями s и s' .

Аналогичным образом расписывается и второе слагаемое выражения (6), и в результате условие $\partial U' / \partial n' = 0$ на искомой поверхности s' принимает вид

$$\sigma_0 + \frac{\partial U}{\partial n} + \frac{\partial U}{\partial t} \Delta n_x + h \frac{\partial^2 U}{\partial n^2} = 0. \quad (8)$$

Так как решение исходной задачи на s удовлетворяет уравнению Лапласа, то последний член в полученном равенстве равен $-h \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}$. Однако в силу того, что решение U , полученное в первом этапе на s , удовлетворяет соотношению (4), то этот член, как и предыдущий, выпадает из (8), и линеаризованное условие (2) на s' принимает окончательный вид

$$\sigma_0 + \frac{\partial U}{\partial n} = 0. \quad (9)$$

Аналогично осуществляется линеаризация соотношения (4) на s' ; в результате приходим к выражению

$$n_y \frac{\partial \Delta U}{\partial t} = \Delta n_x \sigma_0. \quad (10)$$

В развернутой форме

$$\sigma + \Delta\sigma + \frac{1}{2\pi} \int_s \Delta\sigma \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{\rho} \right) ds = \sigma_0; \quad (11)$$

$$n_y \int_s \Delta\sigma \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{\rho} \right) ds = 4\pi \sigma_0 \Delta n_x. \quad (12)$$

Неизвестная постоянная σ_0 определяется из условия однозначной разрешимости [8] уравнения Фредгольма второго рода (11):

$$\sigma_0 = \frac{1}{s_1} \int_{s_1} \sigma ds. \quad (13)$$

Процедура решения уравнений второго этапа последовательного приближения осуществляется следующим образом. После определения σ_0 из (13) и $\Delta\sigma$ на s_1 из (5) решается уравнение (11) относительно $\Delta\sigma$ на остальной части s и, наконец, используется (12) для определения

составляющих Δn_x . Так как приращения компонент нормали связаны соотношением $n_x \Delta n_x + n_y \Delta n_y = 0$, вытекающим из условия $n_x'^2 + n_y'^2 = (n_x + \Delta n_x)^2 + (n_y + \Delta n_y)^2 = 1$ и учтенным при выводе (11), (12), то в результате выполненных вычислений не представляет труда определить форму искомой поверхности s' .

Для этой новой формы вновь проверяется условие (1), т. е. решается прямая задача, и процесс последовательных приближений повторяется до тех пор, пока это условие не будет выполнено с заданной точностью.

Несмотря на то, что при решении обратной задачи используются приближенные линеаризованные уравнения, в целом задача решается в точной постановке, так как при соответствующем увеличении используемых ресурсов ЦВМ решение прямой задачи может иметь сколь угодно малую вычислительную погрешность, а в случае, если условие (1) выполняется, система (11) — (13) имеет только тривиальное решение.

При практическом решении задачи с осевой симметрией интегрирование по углу в цилиндрической системе координат позволяет свести все поверхностные интегралы к контурным с введением полных эллиптических интегралов. Развернутую запись этих соотношений можно найти, например, в [7]. Решение интегральных уравнений производится путем сведения к системе линейных алгебраических уравнений относительно плотности заряда на отдельных дугах контура интегрирования. Среднее значение плотности заряда выносится за знак интеграла, который затем вычисляется методом механических квадратур и становится элементом матрицы линейной алгебраической системы. Отметим, что описанный метод может быть использован для решения более общей задачи, в которой форма части поверхности электрода AB может быть задана произвольно. Абсцисса точки C вычисляется в ходе решения, но закон, определяющий форму поверхности CD , также необходимо задать.

Решение задачи в плоскопараллельном приближении. Для решения аналогичных задач в плоскопараллельном поле можно использовать изложенный выше метод расчета при очевидном изменении ядра интегральных уравнений. Однако в рассматриваемом случае более эффективным и простым является метод, основанный на применении функций комплексного переменного. Этот метод аналогичен используемому в [2], но не требует громоздких промежуточных преобразований.

Будем искать функцию комплексного переменного $z(\omega)$, осуществляющую конформное отображение канонической области — верхней полуплоскости ω на область $ABCD$ существования поля z (см. рис. 1).

Пусть началу и концу скругленного участка соответствуют значения $\omega = -1$; 0 . На границе рассматриваемой области производная комплексного потенциала W — комплексная напряженность $E = \frac{dW}{dz}(\omega) = -E_y - jE_x$ принимает вещественные положительные значения на отрезке $CDOF$, на отрезке FAB — она вещественна и отрицательна. На отрезке BC , соответствующем скругленному участку, $E(\omega)$ имеет постоянный модуль E_0 , а ее аргумент изменяется на π ; единственной особой точкой $E(\omega)$ является нуль при $\omega = \infty$. Нетрудно убедиться, что всем этим условиям удовлетворяет функция

$$E(\omega) = \frac{dW}{dz} = \frac{E_0}{(\sqrt{\omega} + \sqrt{\omega+1})^2}. \quad (14)$$

На основании теоремы Лиувилля можно утверждать, что полученное выражение единственно. Подобным же образом можно получить выражение для производной $dW/d\omega$ в канонической области. Однако для упрощения вычислений примем предположение о том, что ширина обкладок конденсатора велика, и отсутствует влияние противоположного края на поле в рассматриваемой зоне. Это соответствует удалению точек D и O в бесконечность; на плоскости ω им отвечает одна вершина, в которой $dW/d\omega$ имеет простой полюс:

$$\frac{dW}{d\omega} = \frac{U_0}{\pi} \frac{1}{\omega - \lambda}, \quad (15)$$

где U_0 — потенциал электрода.

Исключая из (14) и (15) dW , найдем выражение для производной

$$\frac{dz}{d\omega} = \frac{U_0}{\pi E_0} \frac{(\sqrt{\omega} + \sqrt{\omega+1})^2}{\omega - \lambda},$$

интегрирование которого позволяет определить координаты точек участка BC и все прочие геометрические характеристики системы. Так, координаты точек скругленного участка выражаются через элементарные функции:

$$x - x_c = \frac{U_0}{\pi E_0} \int_0^{\omega} \frac{1+2\omega}{\omega - \lambda} d\omega = \frac{2U_0}{\pi E_0} \left[-\sin^2 \theta + \left(\lambda + \frac{1}{2} \right) \times \right. \\ \left. \times \ln \left(1 + \frac{\sin^2 \theta}{\lambda} \right) \right]; \quad (16a)$$

$$y - y_c = \frac{2U_0}{\pi E_0} \int_0^{\omega} \frac{V(1+\omega)(-\omega)}{\lambda - \omega} d\omega = \frac{2U_0}{\pi E_0} \left[\frac{1}{2} \sin 2\theta + \right. \\ \left. + (1+2\lambda)\theta - 2\sqrt{\lambda(1+\lambda)} \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{1+\lambda}{\lambda}} \operatorname{tg} \theta \right) \right], \quad (16b)$$

в которых для упрощения используется параметрическое представление $\omega = -\sin^2 \theta$. Параметр λ определяет, с одной стороны, относительную толщину электродов. Так, из (16b) при $\theta = \pi/2$ найдем

$$d = \frac{U_0}{E_0} (1 + 2\lambda - 2\sqrt{\lambda(1+\lambda)}). \quad (17)$$

С другой стороны, из (14) получим связь

$$\frac{E_D}{E_0} = \frac{1}{(\sqrt{\lambda} + \sqrt{\lambda+1})^2} = 1 + 2\lambda - 2\sqrt{\lambda(1+\lambda)}. \quad (18)$$

определяющую концентрацию напряженности на скругленном участке как функцию λ . Так как левые части (17) и (18) тождественны, то геометрические характеристики системы и концентрация напряженности связаны замечательным соотношением $E_D/E_0 = \sqrt{d/h}$, откуда найдем $E_0 = U_0/\sqrt{dh}$. При $\lambda = 0$ $E_D/E_0 = 1$, и скругленный участок уходит на бесконечность. Этот случай рассмотрен в [2]; для него формула (16a) теряет смысл, и ее следует заменить на

$$x - x_B = \frac{2h}{\pi} [\ln \sin \theta + \cos^2 \theta],$$

а (16b) упрощается с учетом $\lambda = 0$.

Анализ результатов решения. Решение задачи с осевой симметрией зависит от двух параметров, например от отношения толщины обкладок d и их радиуса R

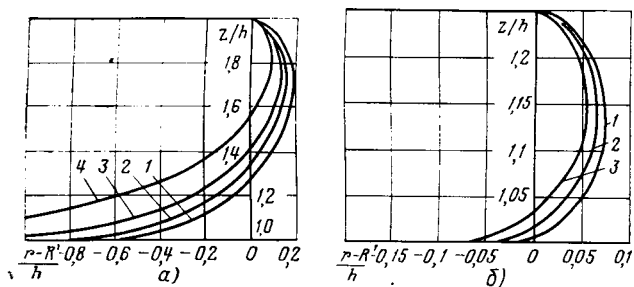


Рис. 2. Профили краевого участка: а — $d/h = 1$; 1 — $R/h = 1$, $R'/R = 1,54$; 2 — $R/h = 2$, $R'/R = 1,38$; 3 — $R/h = 4$, $R'/R = 1,26$; 4 — $R/h = \infty$, $R'/R = \infty$; б — $d/h = 0,25$; 1 — $R/h = 0,25$, $R'/R = 1,045$; 2 — $R/h = 1$, $R'/R = 1,035$; 3 — $R/h = 2$, $R'/R = 1,03$

к расстоянию между электродами. В плоскопараллельном приближении при принятых допущениях второй из указанных параметров выпадает. На рис. 2 изображены профили краевого участка электрода конденсатора, полученные в результате численного расчета по приведенному методу для двух значений относительной толщины электродов. Число последовательных приближений при решении колебалось в пределах от 5 до 15. Процесс считался законченным при наибольшем отклонении распределения плотности заряда на скругленном участке от σ_0 на 2 %. При расчете в качестве исходных принимались указанные на кривых значения относительных радиальных размеров системы; положение граничной точки B краевого участка, характеризуемое координатой R' (рис. 1), определялось в результате расчета. На рис. 2 изображены также кривые, построенные по данным плоскопараллельного приближения. Профиль на рис. 2, а соответствует $\lambda=0$ и имеет бесконечную протяженность. Как следует из (17), при $d/h > 1$, решение задачи в плоскопараллельном приближении отсутствует, т. е. при большой толщине электродов не удастся обеспечить постоянство напряженности на всем краевом участке электрода.

Рассчитанные профили имеют переменную кривизну и характерную несимметричную форму — точка, определяющая радиальный габарит конденсатора R'' , смещена относительно средней плоскости обкладки $z = h + d/2$. Это определяется влиянием противоположного электрода на формирование краевой зоны. При уменьшении относительной толщины электрода влияние противоположного электрода уменьшается, и отмеченная несимметрия проявляется слабее. По мере увеличения радиуса дисковых электродов форма краевого участка приближается к получаемой из расчета в плоскопараллельном приближении, причем зависимость формы от радиуса проявляется слабо, особенно при малой относительной толщине электродов (рис. 2, б). Для данного значения относительной толщины d/h уменьшение радиуса дисков влечет за собой уменьшение кон-

центрации напряженности на скругленном участке. Это проявляется особенно сильно при малых d/h .

В плоскопараллельном случае скругляемый участок имеет наибольший радиальный размер $R'' - R$. Это может быть пояснено следующими соображениями. Поддержание постоянной напряженности на краевом участке BC достигается за счет увеличения средней кривизны его поверхности по мере удаления от противоположного электрода — при перемещении от точки C к B . В осесимметричной системе средняя кривизна k поверхности s определяется суммой обратных значений главных радиусов кривизны ρ_1 в плоскости рис. 1 и $\rho_2 = r$ в перпендикулярной плоскости $z = \text{const}$. Вклад второго слагаемого по мере роста r ослабевает; это позволяет обеспечить необходимое изменение кривизны профиля при меньших значениях ρ_1 по сравнению с плоскопараллельной системой, в которой кривизна $k = 1/\rho_1$. Поэтому выбор профиля краевого участка осесимметричной системы по формулам (16) приведет к меньшим значениям напряженности на скруглении по сравнению с профилем, полученным в результате расчета по методу п. 2. Близость профилей с осевой симметрией к профилям плоскопараллельного приближения объясняется тем, что в малой окрестности точки поверхности электрода их различия, обусловленные различной структурой поля, весьма невелики. Поэтому во многих случаях для практических расчетов можно вместо сложного численного расчета использовать приведенные в статье элементарные формулы.

В заключение отметим, что предложенный метод определения формы электродов обладает большой общностью и может быть использован для рационального выбора профилей различных высоковольтных изоляционных конструкций — высоковольтных вводов, искровых промежутков и др. Указанная схема расчета после некоторых модификаций может быть использована также при ином представлении решения, например в виде потенциала двойного слоя и других типов поверхностно распределенных особенностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rogowski W. Die elektrische Festigkeit am Rande des Plattenkondensators. — Arch. für Electrotechnik, 1923, Bd 12.
2. Felici N. Les surfaces a champ électrique constant. — RGE, 1950, vol. 59, № 11.
3. Bruce F. M. Calibration of uniform-field spark-gaps for H-V measurement at power frequencies. — Journ. of IEE, 1947, vol. 94, pt. 2.
4. Harrison J. A. A computer study of uniform — field electrodes. — British Journ. of Applied Physics, 1967, vol. 18, № 11.
5. Trinh N. G. Electrode design for testing in uniform field gaps. — Trans. IEEE on PAS, 1980, vol. 99, № 3.
6. Амромин Э. Л., Иванов А. Н. Осесимметричное обтекание тел в режиме развитой кавитации. — Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа, 1975, № 3.
7. Иванов А. Н. Гидродинамика развитых кавитационных течений. — Л.: Судостроение, 1980.
8. Михлин С. Г. Курс математической физики. — М.: Наука, 1968.

[14.09.82]

Распределенные параметры конденсаторов

НЕТУШИЛ А. В., доктор техн. наук, ЕРМУРАТСКИЙ П. В., канд. техн. наук

Москва

В литературе конденсатор обычно рассматривается как объект с сосредоточенными параметрами [1—5]. И это оправдано при относительно низких частотах. Лишь для выводов учитывается поверхностный эффект и эффект близости, а плотность тока смещения во всех точках диэлектрика считается постоянной, и принимается линейный закон изменения тока по длине (или ширине) обкладки при постоянстве плотности тока по сечению конденсатора. В то же время в цепях силовой электроники при импульсном режиме и несинусоидальном напряжении на конденсаторе необходимо рассматривать высшие гармоники и учитывать распределенный характер параметров конденсатора и неравномерность распределения плотности тока смещения. Пренебрежение этими факторами может стать причиной неправильного определения полного сопротивления конденсатора для высших гармоник и распределения внутренних источников тепловыделения. Учет в схеме замещения конденсатора магнитных полей с помощью эквивалентной последовательной индуктивности дает верную картину лишь на частотах, значительно ниже частоты первого резонанса конденсатора.

В [2] определяются параметры намотанных конденсаторов с вкладными контактами, при этом обкладки и расположенный между ними диэлектрик рассматриваются как линия с удельными параметрами L_0 и C_0 , однако при расчете емкости и индуктивности секции, распределение тока по длине обкладок принимается линейным. В [6] производится расчет распределения тока по сечению цилиндрического и прямоугольного конденсатора методом эквивалентирования. При этом не учитывается различие в направлении электрических полей в диэлектрике и обкладках конденсатора. Полученное решение дает возрастание плотности тока при переходе от поверхности к оси, тогда как на самом деле картина оказывается значительно более сложной.

В статье исследуются зависимости распределения плотности тока и комплексного сопротивления цилиндрического намотанного конденсатора с торцевыми контактами от частоты с учетом неоднородности полей как по радиусу, так и по длине конденсатора.

Модель конденсатора и расчет его параметров. Рассмотрим конструкцию так называемого «безындукционного» конденсатора (рис. 1). При его изготовлении наматывается рулон из чередующихся лент обкладок (фольга, металлическое покрытие пленки или бумаги) и диэлектрика так, чтобы обкладки несколько выступали за края диэлектрика с разных сторон, после чего на выступающие части обкладок наносится слой металла, образующий контактный узел, к которому припаиваются ленточные или проволоочные выводы. Сопротивление контактного узла, выводов, корпуса и корпусной изоляции учитывать не будем. Тогда реальный конденсатор можно рассматривать как однородную по длине цилиндра систему из двух проводящих пластин спиралевидной формы, разделенных диэлектриком.

Пусть через конденсатор протекает синусоидальный ток, изображаемый комплексом $\dot{I}$, а к выводам приложено напряжение $\dot{U}$. В сечении, перпендикулярном оси конденсатора, две обкладки имеют вид архимедовых

спиралей, шаг которых много меньше их радиуса. Каждый из витков спирали можно условно заменить эквивалентным цилиндром, радиус которого равен среднему радиусу витка спирали. Так от непрерывной спиральной структуры можно перейти к эквивалентной дискретной цилиндрической, состоящей из системы коаксиальных цилиндрических электродов, разделенных тонким слоем диэлектрика¹ (рис. 2).

Электроды, подсоединенные к одному выводу, будем обозначать четными индексами, а ко второму выводу — нечетными. Соответственно токи, подводимые к электродам одной обкладки, обозначим, $\dot{I}_{\alpha 0}, \dot{I}_{\alpha 2}, \dots, \dot{I}_{\alpha 2n}$, а ко второй — $\dot{I}_{\alpha 1}, \dot{I}_{\alpha 3}, \dots, \dot{I}_{\alpha(2n-1)}$.

Рассмотрим пару электродов с номерами k и $k+1$. Ток, проходящий через диэлектрик между ними обозначим $\dot{I}_{dk}$. Аналогично ток от электрода k к предыдущему $(k-1)$ -му $\dot{I}_{d(k-1)}$ и к $(k+1)$ -му от следующего $(k+2)$ -го — $\dot{I}_{d(k+1)}$. Очевидно токи электродов равны суммам соответствующих токов через диэлектрик

$$\dot{I}_{\alpha k} = \dot{I}_{dk} + \dot{I}_{d(k-1)}; \quad \dot{I}_{\alpha(k+1)} = \dot{I}_{dk} + \dot{I}_{d(k+1)}$$

Так как токи на свободных концах электродов равны нулю, то для анализа процессов в коаксиальном конденсаторе может быть применен принцип суперпозиции и рассматриваемая задача разделена на две задачи (рис. 3). В первой задаче (А) к каждому из электродов с одного конца подводятся токи $\dot{I}_{dk}/2$, а со второго конца отводятся такие же токи. Во второй задаче (В) направления токов $\dot{I}_{dk}/2$ чередуются и противоположны на концах электродов. Очевидно, что наложение задач А и В дает исходные условия задачи. Оставшиеся токи $\dot{I}_{d(k-1)}$ и $\dot{I}_{d(k+1)}$ учитываются при аналогичном рассмотрении соседних элементарных конденсаторов.

Напряжение между концами соседних электродов или, что то же самое, между выводами конденсатора $\dot{U}$ может быть определено как сумма напряжения $\dot{U}_A$ — между началом и концом электрода в задаче А и напряжения на диэлектрике $\dot{U}_B$ в задаче В

$$\dot{U} = \dot{U}_A + \dot{U}_B. \quad (1)$$

Для задачи А

$$\dot{U}_A = R_k \frac{\dot{I}_{\alpha k}}{2} + j\omega \Phi_k, \quad (2)$$

где Φ_k — магнитный поток, охватывающий рассматриваемый электрод радиуса r_k , R_k — сопротивление элект-

¹ Именно такую конструкцию имеют вакуумные конденсаторы.

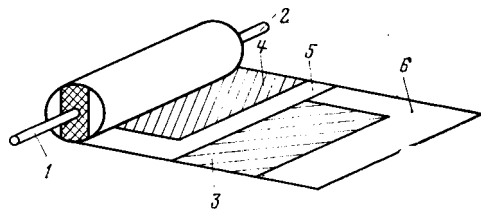


Рис. 1. Цилиндрический конденсатор с торцевыми контактами

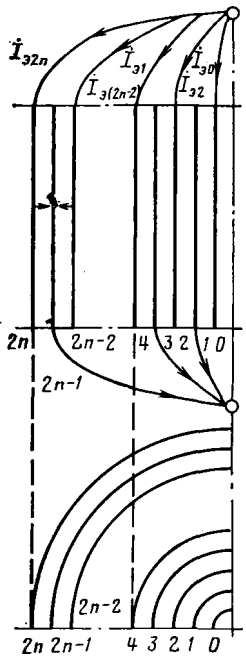


Рис. 2. Токи обкладок коаксиального цилиндрического конденсатора

рода в направлении оси цилиндра:

$$R_k = \frac{l}{\sigma_m \delta 2\pi r_k} \quad (3)$$

Здесь σ_m — удельная проводимость металла обкладки; δ — его толщина; l — длина цилиндра.

Рассматривая только внутреннее магнитное поле конденсатора, поток Φ_k можно выразить следующим образом:

$$\Phi_k = \int_{r_k}^{r_{2n}} \frac{\mu_0 \mu_r l dr}{2\pi r} \sum_{i=0}^k \frac{I_{\partial i}}{2} \quad (4)$$

Для задачи В

$$\dot{U}_B = Z_{B\partial k} \frac{i_{\partial k}}{2}, \quad (5)$$

где $Z_{B\partial k}$ — входное сопротивление коаксиальной линии длиной $l/2$ при холостом ходе:

$$Z_{B\partial k} = Z_{\partial k} \operatorname{cth} \frac{\gamma l}{2} \quad (6)$$

Волновое сопротивление линии

$$Z_{\partial k} = \sqrt{\frac{R_{0k} + j\omega L_{0k}}{G_{0k} + j\omega C_{0k}}}, \quad (7)$$

а ее коэффициент распространения

$$\gamma = \sqrt{(R_{0k} + j\omega L_{0k})(G_{0k} + j\omega C_{0k})}. \quad (8)$$

Удельные параметры линии

$$R_{0k} = \frac{4}{\sigma_m \delta 2\pi r_k}; \quad L_{0k} = \frac{\mu_0 \mu_r d_d}{2\pi r_k};$$

$$C_{0k} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{2\pi r_k}{d_d}, \quad G_{0k} = \omega C_{0k} \operatorname{tg} \delta_d(\omega),$$

где d_d — толщина слоя диэлектрика; δ_d — его угол потерь.

При определении R_{0k} принято, что $I_{\partial k} \approx I_{\partial(k-1)}$ и, следовательно, ток, замыкаемый через диэлектрик линии, равен половине тока, подводимого к электроду ($I_{\partial k} = I_{\partial k}/2$), а сопротивление для него определяется половиной толщины обкладки $\delta/2$.

В соответствии с (1), (2) и (5) можно составить уравнения для каждого из $2n$ электродов. Для крайних электродов радиусов r_0 и r_{2n} имеется ток только одного слоя диэлектрика и, следовательно, удельное сопротивление этих электродов в 2 раза меньше, чем для внутренних электродов. В дальнейшем этим отличием пренебрежем.

Полученная таким образом система уравнений

$$\dot{U} = \dot{U}_A + \dot{U}_B = \frac{i_{\partial k}}{2} \frac{l}{\sigma_m \delta 2\pi r_k} +$$

$$+ j\omega \int_{r_k}^{r_{2n}} \frac{\mu_0 \mu_r l}{2\pi r} dr \sum_{i=0}^k \frac{i_{\partial i}}{2} +$$

$$+ (i_{\partial k}/4) Z_{\partial k} \operatorname{cth} \gamma l/2; \quad k=1, 2, \dots, 2n$$

дает возможность при заданном напряжении $\dot{U}$ найти распределение токов между $2n$ электродами конденсатора.

Решение достаточно громоздкой дискретной задачи (9) может быть существенно упрощено, если от дискретной перейти к непрерывной задаче, заменив неоднородную слоистую структуру в задаче А эквивалентной однородной структурой с эквивалентной плотностью тока [7].

$$j(r) = \frac{i_{\partial k}}{4\pi r_k d_0}$$

и эквивалентной удельной проводимостью

$$\sigma_a = \frac{\sigma_m \delta}{d_0}.$$

Здесь $d_0 = \delta + d_d$ — суммарная толщина одного слоя диэлектрика и обкладки.

В таком случае от системы уравнений со многими неизвестными можно перейти к одному интегральному уравнению

$$\dot{U} = \dot{U}_A + \dot{U}_B = \frac{l}{\sigma_a} j(r) +$$

$$+ j\omega \mu_0 \mu_r l \int_r^{r_{2n}} \frac{dr}{r} \int_0^r r j(r) dr + j(r) \xi \frac{l}{\sigma_a}, \quad (10)$$

где $\dot{U}$ и ξ от r не зависят, а

$$\xi = \frac{\sigma_a d_0}{2l} \sqrt{\frac{4d_d}{\sigma_m \delta} + j\omega \mu_0 \mu_r d_d^2} \operatorname{cth} \frac{\gamma l}{2}.$$

После двукратного дифференцирования (10) по r получаем уравнение

$$\frac{d^2 j(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dj(r)}{dr} - \frac{j\omega \mu_0 \mu_r \sigma_a}{(1 + \xi)} j(r) = 0, \quad (11)$$

решение которого выражается с помощью функций Бесселя

$$j(w) = \dot{A} J_0(w) + \dot{B} N_0(w) \quad (12)$$

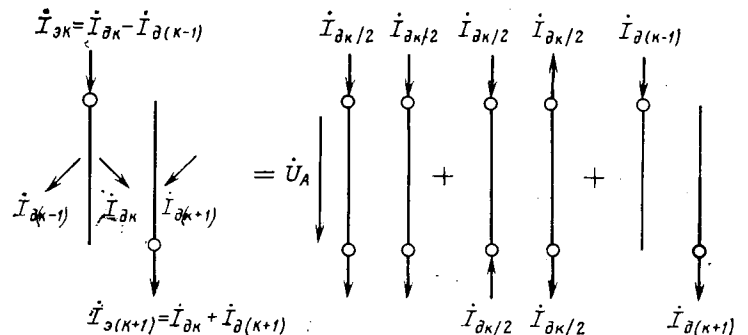


Рис. 3. Суперпозиция токов обкладок

от комплексного аргумента

$$\underline{w} = \frac{r}{r_{2n}} \underline{u} = r \sqrt{\frac{-j\omega\mu_0\mu_r\sigma_3}{1+\xi}}. \quad (13)$$

Так как $N_0(\underline{w})$ стремится к бесконечности при $\underline{w} = 0$, то очевидно, что при $r \approx 0$ $B=0$. Далее будем считать $r_0=0$.

Для определения постоянной интегрирования $\dot{A}$ воспользуемся уравнением

$$\dot{I} = \int_0^{r_{2n}} \dot{J}(r) 2\pi r dr. \quad (14)$$

После подстановки в (14) выражения (12) и интегрирования с учетом соотношения

$$\int_0^{\underline{w}} x \underline{J}_0(x) dx = \underline{w} \underline{J}_1(\underline{w})$$

получаем

$$\dot{A} = \frac{i}{2\pi r_{2n}^2} \frac{\underline{v}}{\underline{J}_1(\underline{v})},$$

а плотность тока

$$\dot{J}(r) = \frac{i}{\pi r_{2n}^2} \frac{\underline{v} \underline{J}_0(r/r_{2n})}{\underline{J}_1(\underline{v})}. \quad (15)$$

Первый сомножитель есть ничто иное, как средняя плотность тока через поперечное сечение конденсатора. От известного выражения для цилиндрического проводника, полученное выражение плотности тока отличается комплексным аргументом $\underline{v}$ функций Бесселя 1-го рода нулевого и первого порядка.

Для определения комплексного сопротивления конденсатора следует вычислить напряжение $\dot{U}$, подставив (15) в уравнение (10) и выполнив интегрирование по r :

$$\begin{aligned} \dot{U} = & \frac{l}{\sigma_3} (1 + \xi) \frac{i}{\pi r_{2n}^2} \frac{\underline{v} \underline{J}_0(r/r_{2n})}{\underline{J}_1(\underline{v})} + \\ & + \frac{j\omega\mu_r\mu_0 l}{2\pi r_{2n} \underline{J}_1(\underline{v})} \int_r^{r_{2n}} \underline{J}_1\left(\frac{r}{r_{2n}} \underline{v}\right) dr. \end{aligned} \quad (16)$$

Выражение (16) справедливо для всех витков конденсаторов, в том числе и для внешнего, у которого $r=r_{2n}$. Тогда интеграл в (16) равен нулю и комплексное сопротивление конденсатора

$$\underline{Z} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{l(1+\xi)}{2\pi r_{2n}^2 \sigma_3} \frac{\underline{v} \underline{J}_0(\underline{v})}{\underline{J}_1(\underline{v})}. \quad (17)$$

Отметим, что это выражение сопротивления не учитывает влияния краин, контактного узла, выводов, внешнего магнитного поля.

Частотные характеристики конденсатора. Для удобства расчетов введем относительные безразмерные переменные

$$\underline{Z}^* = \underline{Z}/R_{06}; \quad \alpha = \omega\tau_c; \quad \beta = \tau_L/\tau_c. \quad (18)$$

Здесь R_{06} — сопротивление двух обкладок вдоль оси, соединенных параллельно

$$R_{06} = \frac{l}{\sigma_3 \pi r_{2n}^2},$$

а постоянные времени $\tau_c = R_0 C_0 l^2$ и $\tau_L = L_0/R_0$. Тогда

$$\underline{Z}^* = (1 + \xi) \frac{\underline{v} \underline{J}_0(\underline{v})}{\underline{J}_1(\underline{v})}; \quad (19)$$

$$\xi = 2 \sqrt{\frac{1+j\alpha\beta}{\alpha(\operatorname{tg} \delta_d + j)}} \operatorname{cth} \frac{1}{2} \sqrt{\alpha(1+j\alpha\beta)(\operatorname{tg} \delta_d + j)}; \quad (20)$$

$$\underline{v} = \frac{2r_{2n}}{\sqrt{d_0 d_d}} \sqrt{\frac{-j\alpha\beta}{1+\xi}}. \quad (21)$$

Расчеты $\underline{J}_0(\underline{v})$ и $\underline{J}_1(\underline{v})$ производились с помощью ряда

$$\underline{J}_n(\underline{v}) = \sum_{k=1}^{30} \frac{(-1)^k (\underline{v}/2)^{n+2k}}{k! \Gamma(n+k+1)}. \quad (22)$$

Относительная ошибка приближения не превосходит 10^{-6} при $|\underline{v}| < 20$.

В области низких частот, когда $\alpha \ll 1$,

$$\xi \approx \frac{4}{j\alpha}; \quad \underline{v} \approx 5\alpha; \quad \underline{Z}^* \approx \xi \approx \frac{4}{j\alpha} = \frac{4}{j\omega C_0 R_0 l^2},$$

т. е. конденсатор обладает чисто емкостным сопротивлением. С ростом частоты начинают влиять последний сомножитель в (19), выраженный через функции Бесселя и учитывающий влияние перераспределения плотности тока по конденсатору под действием внутреннего магнитного поля, а также ξ — относительное входное сопротивление линии в режиме холостого хода. Их совместное влияние приводит к тому, что годограф комплексного сопротивления конденсатора (рис. 4), проходя вблизи мнимой оси, пересекает действительную ось при частоте первого резонанса, а затем образует петли, поочередно меняя характер сопротивления с емкостного на индуктивный и наоборот. Число петель зависит от $\operatorname{tg} \delta_d$ и сопротивления обкладок: чем R_0 больше (тоньше слой металлизации) или больше потери в диэлектрике, тем больше затухание в системе и меньше наблюдается резонансов. И наоборот, для фольговых обкладок, у которых R_0 на 1—3 порядка меньше, чем для металлизированных, имеет место большее число петель и резонансов, как в высокочастотной системе.

При высоких частотах магнитное поле вытесняет ток к периферии конденсатора и частотный годограф его сопротивления идет аналогично сопротивлению проводника с учетом поверхностного эффекта [8].

Для оценки значений параметров реальных конденсаторов рассмотрим цилиндрический металлоплочный конденсатор К-71-4 емкости 1 мкФ [10]. Его конструктивные параметры: $\delta=0,04$ мкм; $a=5$ м; $l=0,05$ м; $d_d=8$ мкм; $\epsilon_r=2$; $r_{с.п.}=1/(\sigma_m \delta)=2$ Ом; $D=2$; $r_{2n}=1,5$ см; $d_0=19,5$ мкм.

Электрические параметры: $R_{06} 2\pi r_{2n} = 8$ Ом; $L_{06} 2\pi r_{2n} = 10^{-11}$ Гн; $C_{06}/(2\pi r_{2n}) = 2 \cdot 10^{-6}$ Ф; $\operatorname{tg} \delta_d = 2 \cdot 10^{-4}$; $\tau_c = 4,4 \cdot 10^{-8}$ с; $\tau_L = 1,25 \cdot 10^{-12}$ с; $\beta = 0,283 \cdot 10^{-4}$.

На рис. 4 (кривая б) представлен на комплексной плоскости годограф $\underline{Z}^*$ этого конденсатора. При $\alpha = 0,7655$, что соответствует $f \approx 2,74$ МГц, имеет место резонанс, при этом $\underline{Z}^* = 1,88$. По данным режима резонанса можно определить параметры последовательной схемы замещения $R_s = 21$ мОм; $L = 3,35$ нГн; $C = 1$ мкФ. Для сравнения отметим, что обычно принимают $R_s = 2/3$ $R_{106} = 14,8$ мОм, а $L = \frac{\mu_0 \mu_r l}{8\pi} = 2,5$ нГн*. Тогда как

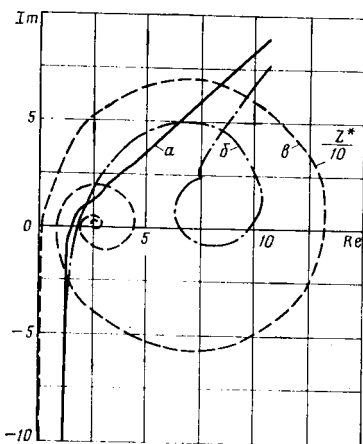


Рис. 4. Частотный годограф относительного комплексного сопротивления конденсатора:

$a - r_{\text{сд}} = 8 \text{ Ом}$; $b - r_{\text{сд}} = 2 \text{ Ом}$; $v - r_{\text{сд}} = 0,5 \text{ Ом}$

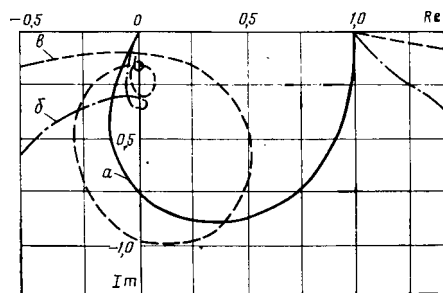


Рис. 5. Частотный годограф относительной комплексной емкости конденсатора

индуктивность бифилярной линии на 3—4 порядка меньше.

Таким образом, на частотах до первого резонанса можно использовать схему замещения конденсатора с сосредоточенными параметрами, причем индуктивность обусловлена главным образом внутренним магнитным полем обкладок (задача А). Магнитные поля токов смещения практически взаимно компенсируются.

Для сравнения на рис. 4 (кривая a) приведен годограф для случая более тонкого слоя металлизации ($r_{\text{сд}} = 8 \text{ Ом}$, $\beta = 0,177 \cdot 10^{-5}$), а на рис. 4 (кривая v) — для конденсатора с $r_{\text{сд}} = 0,5 \text{ Ом}$; $\beta = 0,45 \cdot 10^{-3}$.

На рис. 5 приведены годографы относительной комплексной емкости конденсатора

$$C^* = \frac{C}{C_n} = \frac{4}{j\alpha Z} = C' + jC'' \quad (23)$$

При $\alpha \ll 1$ $C^* = 1$, затем наблюдается рост мнимой составляющей C'' , соответствующей потерям в обкладках и диэлектрике конденсатора и действительной составляющей C' за счет частичной компенсации емкостного сопротивления индуктивным. При резонансе C^* — чисто мнимая, годограф пересекает мнимую ось. Положительные значения C' соответствуют емкостному характеру сопротивления конденсатора, а отрицательные — индуктивному.

Распределение плотности тока в обкладках конденсатора. Расчет распределения плотности тока также основан на принципе суперпозиции для рассмотренной выше модели реального конденсатора. Действительно, в задаче А имеет место только радиальная неоднородность плотности тока, обусловленная влиянием внутреннего магнитного поля. Тогда как в задаче В плотность тока изменяется по длине и равна нулю в середине линии при $x = l/2$. Наложение обеих задач дает полную картину распределения плотности тока в конденсаторе.

На рис. 6, а изображена зависимость относительной плотности тока $J^*(r) = J(r)/(I/\pi r_{2n}^2)$ от r — расстояния до оси при различных значениях относительной частоты α . В теле цилиндрической формы со значительными токами смещения в диэлектрике, каковым и является конденсатор, поверхностный эффект проявляется иначе, чем в проводнике или плоской пластине, потому что по мере проникновения электромагнитной волны в глубь конденсатора ее фронт сокращается. При низких частотах плотность тока практически одинакова во всех витках рулона конденсатора. По мере роста частоты возрастает плотность тока вблизи оси рулона. В этой области раньше, чем в других наступает резонанс напряжений, поскольку внутренние витки оказываются сцепленными со всем магнитным полем — их индуктивность больше. Этим можно объяснить возрастание тока во внутренних областях по сравнению с периферийными витками.

При дальнейшем увеличении частоты наблюдается уменьшение плотности тока в средних витках конденсатора, которое тем более значительно, чем выше частота.

На рис. 6, б показано геометрическое место конца вектора J^* для точек, отмеченных на графике рис. 6, а. Из рис. 6, б видно, что в наружных витках ток опережает, а во внутренних — отстает по фазе от общего тока конденсатора.

Распределение плотности тока в обкладках по длине конденсатора определяется волновыми процессами в бифилярной линии. Для линии в режиме холостого хода ток на расстоянии x от начала [9]

$$I(x) = I_1 \left(\text{ch } \gamma x - \text{cth } \frac{\gamma l}{2} \text{sh } \gamma x \right) \quad (24)$$

Переходя к относительной плотности тока и учитывая (15), получаем ее зависимость от координат r и x

$$J^*(r, x) = \frac{v J_0 \left(\frac{r}{r_{2n}} v \right)}{2 J_1(v)} - \frac{1}{2} \left[1 + \text{ch } \frac{x}{l} \xi - \text{cth } \frac{\xi}{2} \text{sh } \frac{x}{l} \xi \right], \quad (25)$$

где

$$\xi = \gamma l = \sqrt{\alpha(1 + j\alpha\beta)} (\text{tg } \delta_d + j).$$

При низких частотах ($\alpha \ll 1$) распределение плотности тока линейное. С ростом частоты на среднем участке в обеих обкладках плотность тока становится почти постоянной и равной половине начальной плотности тока. На концах обкладок, близких к контактному узлу, плотность тока резко изменяется.

Следует иметь в виду, что зависимость $J^*(x)$ отличается от линейной лишь при $\alpha \gg 1$, т. е. этот эффект наблюдается лишь в условиях сильной неоднородности плотности тока. Действительно, изменение плотности тока по длине конденсатора связано с волновыми процессами, проявляющими себя, когда длина волны соизмерима с

* В [11] рекомендуется индуктивность малогабаритных цилиндрических конденсаторов определять как индуктивность првода тех же размеров.

размерами конденсатора. Так как $\lambda = \frac{2l \cdot 2\pi}{2\alpha}$, то $\lambda \approx l$ при $\alpha \approx 80$.

Распределение источников тепла. Источниками тепловыделения в конденсаторе являются диэлектрик и металлические части, главным образом обкладки и контактный узел. Мощность потерь в диэлектрике

$$P_d = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta_d \quad (26)$$

определяется значением $\operatorname{tg} \delta_d$, частотой и водействующим на конденсатор напряжением. Напряженность поля в диэлектрике можно считать одинаковой во всех точках, кроме краев обкладок, где поле неоднородно. Тепловыделение в диэлектрике оказывается различным в разных точках, если различны температуры диэлектрика в этих точках и $\operatorname{tg} \delta_d$ зависит от температуры.

Тепловыделение в обкладках определяется джоулевыми потерями и зависит от распределения плотности тока

$$dP = |j|^2 / \sigma_s dV. \quad (27)$$

Используя зависимость $j^*(r, x)$, полученную выше, можно определить мощность тепловыделения в обкладках для каждой точки конденсатора. На рис. 7 изображены изменения мощности тепловыделения по радиусу и по длине конденсатора. Здесь, как и раньше, уместно отметить, что радиальная неоднородность тепловыделения начинает наблюдаться при $\alpha > 0,1$, когда глубина проникновения электромагнитной волны становится соизмеримой с радиусом конденсатора, а неоднородность по длине — при $\alpha \gg 1$. Таким образом, при высоких частотах плотность тепловыделения в обкладках больше на периферии конденсатора, у контактного узла и вблизи оси конденсатора, т. е. следует уменьшить предельно допустимый ток при работе конденсатора на высоких частотах и в импульсном режиме.

Если считать распределение тока по длине обкладки линейным, а по радиусу — однородным, то

$$P_m = \frac{2}{3} I^2 R_{об}. \quad (28)$$

Тогда отношение мощности потерь в обкладках к мощности потерь в диэлектрике равно

$$P_m / P_d = \frac{2/3 (U \omega C)^2 2 R_{об}}{U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta_d} = \frac{\alpha}{3 \operatorname{tg} \delta_d} \quad (29)$$

и потери в обкладках превышают потери в диэлектрике при относительной частоте $\alpha > 3 \operatorname{tg} \delta_d$. Современные диэлектрики из синтетической пленки имеют $\operatorname{tg} \delta_d \approx 10^{-4}$, таким образом граничная частота $\omega = 3 \cdot 10^{-4} / \tau_c \approx 10^4$ с⁻¹ и уже при сравнительно низких частотах потери в обкладках P_m превышают потери в диэлектрике P_d .

Выводы. Полученные выражения для комплексного сопротивления и комплексной емкости конденсатора позволяют в широком диапазоне частот определить его эквивалентные емкость и активное сопротивление. На повышенных частотах наблюдается увеличение емкости и резонансные явления, сопровождаемые изменением характера реактивного сопротивления конденсатора.

На высоких частотах плотность тока возрастает вблизи оси конденсатора и на периферии. В промежуточной области наблюдается провал. Огклонение от линейного характера изменения плотности тока по длине конденсатора проявляется лишь на частоте, значительно выше частоты первого резонанса. С неоднородностью

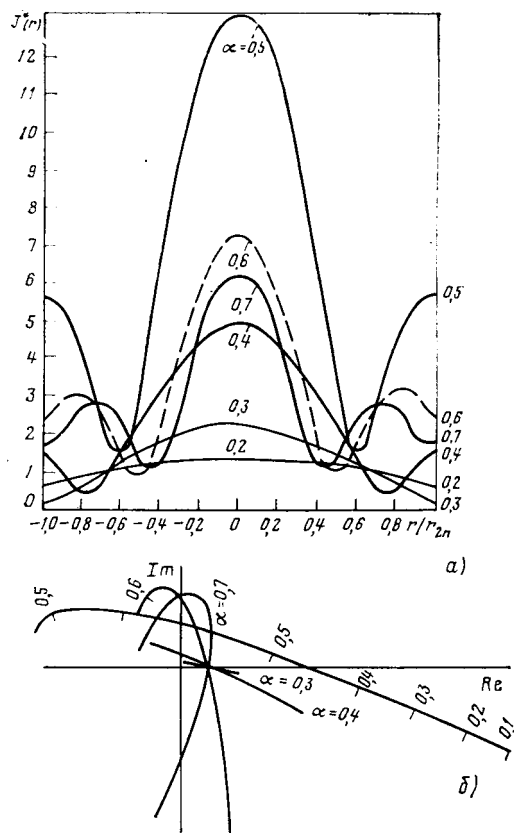


Рис. 6. Распределение плотности тока по радиусу конденсатора

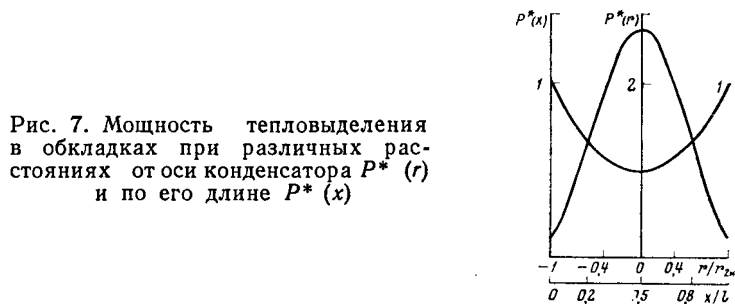


Рис. 7. Мощность тепловыделения в обкладках при различных расстояниях от оси конденсатора $P^*(r)$ и по его длине $P^*(x)$

распределения плотности тока непосредственно связана неравномерность тепловыделения. Наиболее опасным являются центральные области конденсатора, периферийные витки и области контактного узла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Силовые электрические конденсаторы/Г. С. Кучинский, Н. И. Назаров, Г. Т. Назарова, И. Ф. Переселенцев. — М.: Энергия, 1975.
2. Кучинский Г. С. Высоковольтные импульсные конденсаторы. — Л.: Энергия, 1973.
3. Ренне В. Т., Багалеи Ю. В., Фридрих И. Д. Расчет и конструирование конденсаторов. — Киев: Техника, 1966.
4. Ренне В. Т. Пленочные конденсаторы с органическим синтетическим диэлектриком. — Л.: Энергия, 1971.
5. Ериуратский В. В., Ериуратский П. В. Конденсаторы переменного тока в тиристорных преобразователях. — М.: Энергия, 1979.
6. Кременецкий И. И. Электромагнитные явления в конденсаторах при воздействии синусоидального напряжения высокой частоты. — Электричество, 1973, № 11.
7. Озгрейко В. Н. Расчет электромагнитных полей в многослойных средах. — Л.: Ленинградский университет, 1981.
8. Негушил А. В., Поливанов К. М. Основы электротехники. Ч. 3. Теория электромагнитного поля. — М.: Госэнергоиздат, 1956.

9. Основы теории цепей/Г. В. Зевеке и др. — М.: Энергия, 1975.
10. Справочник по электрическим конденсаторам/Под ред. В. В. Ермуратского. — Кишинев: Штиинца, 1982.

11. Fabbri C. Miniaturized plastic film capacitors: their technology and reliability. — Colloq. int. nouv. orient. compos. passifs: mater., technol., mises oeuvre, Paris, 29 mars—1 avr., 1982. — Paris, 1982.

[28.04.83]

УДК 621.316.542.027.3.064.25.014.31.001.24

Влияние материала дугогасительной камеры на характеристики дуги в малообъемных масляных выключателях

ЯЛАНОВА Е. Т., канд. тех. наук

София

В масляных выключателях основной объем газов, охлаждающих дугу, получается при разложении трансформаторного масла; поэтому роль твердого изоляционного материала дугогасительной камеры обычно не учитывается, а выбор его при разработке дугогасительных устройств производится на основе большего объема коммутационных испытаний. Однако проведенные в НРБ исследования показывают, что имеется сильно выраженное влияние вида твердого изоляционного материала на коммутационные характеристики малообъемных выключателей. Для объяснения этого влияния была использована теория, позволившая сформулировать основные качественные критерии по оценке эффективности твердых изоляционных материалов в дугогасительных устройствах. Последующие исследования в области низкотемпературной плазмы и плазмохимии, а также опубликованные недавно теоретические и экспериментальные результаты исследований, стабилизированных в изоляционном канале и в газовом потоке мощных дуг [1, 4], дали возможности для более подробного выяснения взаимодействия дуги с твердыми изоляционными материалами с учетом тепломассообменных процессов. Такой подход открывает перспективу целенаправленного выбора материалов при разработке дугогасительных систем и сокращения объема необходимых при этом коммутационных испытаний, а также повышения отключающей способности выключателей путем использования более эффективных дугогасительных материалов.

Как известно, в масляных выключателях дуга горит в среде продуктов разложения масла и на некоторых своих участках входит в соприкосновение с поверхностью твердых изоляционных материалов. При превышении определенного значения отключаемого тока плазма дуги заполняет узкие каналы дугогасительного устройства, затормаживая аксиальный парогазовый и масляный поток на все большей части полупериода тока и подвергая стенку каналов все более продолжительному термическому воздействию. Исследования показывают, что для малообъемных выключателей высокого напряжения типа ММО, выпускаемых в НРБ¹, такой режим достигается при токах отключения порядка 6÷10 кА. С учетом этого, выше некоторого значения тока мощную стационарную дугу в каналах дугогасительного устройства малообъемных выключателей можно рассматривать как дугу, горящую в узком канале из изоляционного материала, для которой хорошим приближением является двухзонная модель [2].

Согласно этим представлениям, дуговой столб с температурой T_d и проводимостью γ_d сконцентрирован в канале и отделяется от изоляционной стенки газовым слоем. Газовый слой образуется при разрушении твердого изоляционного материала и имеет относительно низкие температуру T_r и электрическую проводимость γ_r . Схемы модели и основных тепломассообменных процессов в каналах дугогасительного устройства показаны на рис. 1.

Характерной особенностью модели является допущение об изотермичности плазмы не только в аксиальном, но и в радиальном направлении и наличие большого температурного градиента в пограничном слое дуги δ . Приблизительная одинаковость температур по всему рассматриваемому объему плазмы связана с наличием высокого давления и большой концентрацией металлических паров, что при значительном диаметре дуги обуславливает повышенную теплопроводность внутри нее (теплопроводность излучением или диффузией излучения) [1—3]. Учет радиационных превращений внутри дугового столба приводит в [2] к выражению

$$q_d = 2\pi r_d \sigma T_d^4 [1 - \exp(-pr_d)^n], \quad (1)$$

где q_d — радиационный поток, поступающий из внутренних слоев плазмы к пограничному слою δ , т. е. генерированный в дуге мощный поток, $q_d = E_d i_d$; r_d — радиус дуги; σ — постоянная Стефана—Больцмана; T_d — температура дуги; p — давление; n — постоянный коэффициент.

Выражение (1) получено на основе спектрального интеграла, учитывающего функцию распределения Планка, спектральную частоту и абсорбционный коэффициент

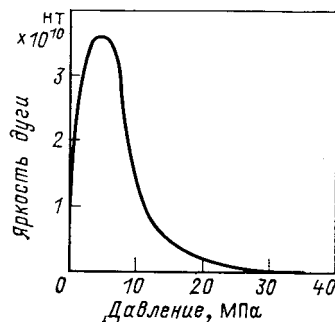
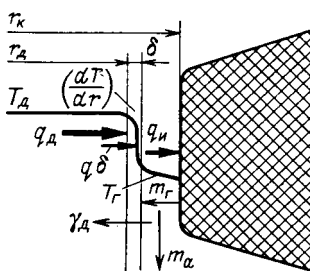


Рис. 1. Схема тепломассообменных процессов в канале дисков дугогасительного устройства

Рис. 2. Зависимость яркости импульсной дуги от давления (по [1])

¹ Основные коммутационные испытания и исследования выключателей типа ММО проведены совместно с НИЦ ВВА.

плазмы. Согласно [2], это приближенное соотношение хорошо совпадает с экспериментом для различных газов в соответствующем диапазоне давлений, температур и геометрических размеров дуги ($1,0 \leq p \leq 35,0$ МПа; $15000 \leq T_d \leq 25000$ К; $1 \leq r_d \leq 5$ мм).

При отключении больших токов выключателями типа ММО радиус дуги в каналах дисков дугогасительного устройства составляет 10—12 мм, а средние значения давления во внутренних объемах камеры превышают $5 \div 10$ МПа. Для этих условий $1 - \exp(-pr_d) \approx 1$, и соотношение (1) можно представить в виде:

$$q_d \approx 2\pi r_d \sigma T_d^4. \quad (2)$$

В соответствии с выражением (2) мощную дугу в малообъемных выключателях можем рассматривать как абсолютно черное цилиндрическое тело с радиусом r_d и температурой T_d . Так как мощностной поток, генерированный в дуге q_d возможно измерить, то из выражения (2) с приближением можно оценить температуру дуги T_d . Очевидно, чем выше эффективное значение отключаемого тока и соответственно этому выше давление, тем выше оптическая плотность плазмы и, следовательно, дуга ближе к модели абсолютно черного тела, т. е. с большей точностью может быть определена из выражения (2) ее температура T_d .

Таким образом, в узких каналах дугогасительного устройства при отключении больших токов мощный поток q_d , поступающий из внутренних слоев дуги на ее пограничный слой δ , по своему характеру является радиационным потоком. Часть этого потока q_δ поглощается в пограничном слое δ за счет повышения энергетического состояния поступающей в дугу с разрушающей стенки канала массы m_δ . Остальная же его часть $q_n = q_d - q_\delta$ излучается поверхностью дуги и, достигая стенок канала, расходуется на разрушение твердого изоляционного материала и на повышение теплосодержания выделяющихся газов. Баланс на разрушающейся поверхности канала [2]

$$q_n = m_r [h(T_r) + \Delta h_r], \quad (3)$$

где m_r — массовый поток с разрушающейся стенки канала; $h(T_r)$ — энтальпия газового слоя; Δh_r — энтальпия разрушения или деструкции твердого изоляционного материала.

Поглощающий граничный слой δ по своим характеристикам сильно неоднороден. С ростом давления выше 3—4 МПа и с увеличением концентрации тяжелых металлических атомов его поглощающая способность сильно возрастает (эффект «запертости плазмы»). Это обуславливает соответствующее снижение излучаемого дугой теплового потока q_n . Для более точной оценки характера изменения последнего можно пользоваться результатами исследования яркости мощных импульсных дуг [1]. Согласно [1], эти результаты могут быть применены в отношении стационарных мощных дуг, поскольку на максимуме импульса выполняются условия квазистационарности.

На рис. 2 показана экспериментальная зависимость яркости на максимуме импульса мощной дуги от давления, приведенная в [1] (ток дуги 20 кА, длина дуги 10 см, диаметр — 4—5 см, время разряда 1 мс). Как видно, с ростом давления поверхностная яркость сильно возрастает, достигая максимальных значений при давлениях порядка 3—4 МПа, после чего быстро уменьшается. Этот сложный характер изменения излучаемого

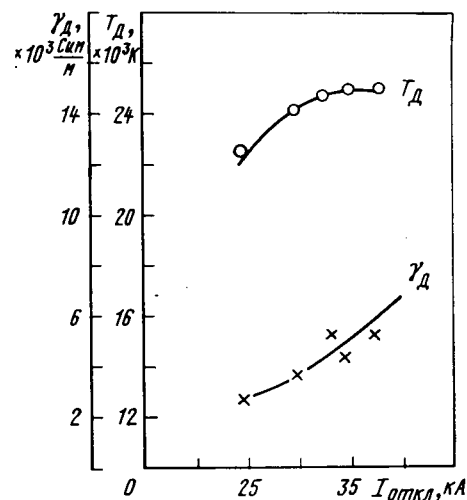


Рис. 3. Зависимость температуры и проводимости дуги от отключаемого тока в камере с большим газовыделением (выключатель типа ММО)

дугой потока с давлением должен существенно сказываться на энергетическом балансе и на характеристике дуги в мощных малообъемных выключателях.

В начальный период отключения в малообъемных масляных выключателях длина дуги относительно невелика. Это значительно облегчает распространение металлических паров по длине дуги и ведет к относительно большим тепловым нагрузкам на контактные элементы выключателя. При отключении больших токов диаметр дугового столба в каналах дугогасительного устройства на большей части полупериода тока ограничен диаметром канала. В таком режиме конвекционное охлаждение дуги в каналах осуществляется лишь за счет аксиального истечения горячего газа из граничного газового слоя, прилегающего к стенке канала, образованного продуктами радиационного разрушения твердого изоляционного материала. Это конвекционное охлаждение значительно менее эффективно по сравнению с охлаждением парами и газами масла при аксиальном и поперечном дутье. Поэтому на этом начальном периоде горения дуги конвективным рассеянием энергии можно пренебречь, и энергетический баланс дуги рассматривать в виде:

$$q_d = E_d i_d = q_{н.э} + q_n, \quad (4)$$

где $q_{н.э}$ — тепловой поток, направленный на контактные элементы выключателя.

Тепловой поток q_n , рассеиваемый дугой путем излучения, является функцией давления и качественно описывается кривой, аналогичной рис. 2. Как известно, величины давлений в дугогасительных камерах малообъемных выключателей в зависимости от конструкции и режима отключения меняются от десятых долей до десяти и более мегапаскалей, т. е. в том диапазоне давлений, где наблюдается очень резкое изменение излучаемого теплового потока q_n . При отключении больших токов средние значения давления в дугогасительной камере обычно выше 3—4 МПа, и концентрация металлических паров значительна, поэтому малообъемные выключатели будут работать на падающей ветви кривой рис. 2. Как показано в [4], продукты газовой выделения твердого материала приводят к сильному возрастанию давления в каналах. Поэтому, если использовать твер-

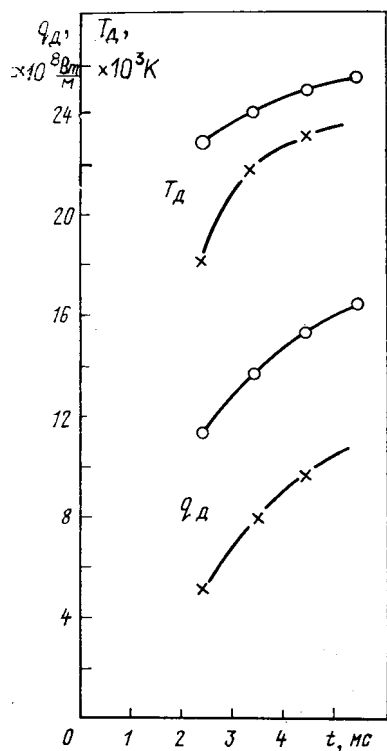


Рис. 4. Температуры и мощности дуги при использовании материалов с различным газовыделением в выключателе типа ММО: $\bigcirc$ — материал с низким газовыделением, $I_{откл} = 30$ кА; $\times$ — материал с высоким газовыделением, $I_{откл} = 31,8$ кА

дые материалы с повышенным газовыделением, то в этом режиме, в соответствии с кривой (2), излучаемый тепловой поток q_d будет снижаться в значительной степени, чем при использовании материала с низкой газовойделяющей способностью. Это соответственно приведет к увеличению теплосодержания плазмы и усилению теплового потока $q_{к.в.}$, направленного на контактные элементы.

При больших токах мощный поток на контактах рассеивается главным образом за счет испарения металла. Следовательно, повышенное газовыделение с поверхности твердого материала вызывает такие изменения в мощностном балансе дуги, которые приводят к стационарному ее состоянию с более высокой концентрацией металлических паров. Это обуславливает большие значения проводимости дуги и более низкие дуговые градиенты.

Если же отключаются относительно небольшие токи, при которых средние значения давления в камере не превышают 3—4 МПа и концентрация металлических паров в дуге ниже, то выключатель будет работать на возрастающей ветви кривой рис. 2. В этом режиме интенсивное газовыделение с поверхности канала и повышение давления в нем приводят к усилению радиационного потока q_d , поступающего к твердому материалу. Это соответственно отражается на мощностном балансе и на характеристиках дуги, снижая ее проводимость и увеличивая градиенты, а также на износе дугогасительной камеры. Таким образом, из-за наличия сильно выраженного максимума в кривой яркости (рис. 2) при использовании твердых материалов с большой газовойделяющей способностью имеется некоторое авторегулирование теплового потока, поступающего к поверхности дугогасительной камеры — относительное ослабление его при больших токах отключения и усиления — при малых. Это обстоятельство способствует эффективной работе дугогасительного устройства в широком диапазоне отключаемых токов и может быть целенаправленно использовано при разработке мощных дугогасительных устройств малообъемных выключателей.

Рассматривая дугу отключения с током порядка 25—40 кА в малообъемных выключателях типа ММО как абсолютно черное тело, можно приблизительно оценить температуру дуги в канале и ее проводимость

в функции отключаемого тока. Расчеты произведены по осциллограммам отключения для начального периода горения дуги, когда, согласно приведенным выше соображениям, конвекционным теплообменом можно пренебречь. Температура рассчитана по (2) для амплитудного значения тока и среднего градиента дуги в соответствии с [2] $r_d \approx 0,9 r_k$ (r_k — радиус канала диска). Удельная проводимость

$$\gamma_d = \frac{i}{\pi r_d^2 E_d}, \quad (5)$$

где i_d — амплитуда тока; E_d — среднее значение градиента дуги, рассчитанное для момента амплитуды тока.

Полученные результаты для T_d и γ_d отнесены к эффективным значениям тока рассматриваемого полу-

периода. Как видно из рис. 3, при отключаемых токах выше 25—30 кА рост тока в выключателях типа ММО более не приводит к росту температуры дуги, и в дальнейшем она имеет тенденцию снижаться при одновременном росте проводимости. Этот характер кривых дает основание предполагать, что в начальный период горения дуги при токах порядка 30 кА достигаются такие значения давления и концентрации металлических паров в плазме, при которых выключатель начинает работать на падающей ветви кривой рис. 2. В этом режиме рост отключаемого тока и давления ограничивает рассеиваемый во внешнюю среду радиационный мощный поток и усиливает тепловую нагрузку на контактные элементы. Коммутационные испытания показали, что при токах отключения выше 30 кА наблюдается некоторое уменьшение износа дисков дугогасительного устройства, что свидетельствует об относительном снижении теплового потока, рассеиваемого на поверхности твердого изоляционного материала.

На рис. 4 показаны кривые изменения мощности и температуры дуги при использовании твердых материалов с различной газовойделяющей способностью. Генерированный в дуге мощный поток и температура дуги рассчитаны на основе осциллограмм отключения с интервалом $\Delta t = 1$ мс для нескольких последних миллисекунд начального периода горения дуги. Несмотря на то, что в дугогасительной камере выключателей типа ММО в этом режиме дуга горит в каналах лишь на небольшой части своей длины (около 30 %), видно, что при использовании материала с более высокой газовойделяющей способностью генерированный в дуге мощный поток ниже и соответственно ниже ее температура.

В малообъемных масляных выключателях с поперечным дутьем дуга горит на большем участке в каналах дугогасительного устройства, поэтому влияние твердого материала на параметры дуги выражено значительно сильнее. Так, было установлено, что, сохраняя все параметры дугогасительного устройства выключателей с поперечным дутьем типа А и лишь заменяя тип гетинакса другим, более газовойделяющим, получаем значительное снижение градиентов дуги и соответственно выделяющейся в дуге энергии (в два—три раза); при этом сокращается время горения дуги и существенно возрастает отключающая способность выключателей (на 30—40 %). Более подробные экспериментальные данные о влиянии вида твердого материала на параметры дуги и на коммутационное поведение малообъемных выключателей с поперечным дутьем приведены в [5].

Определение параметров сверхпроводниковых катушек с параллельным соединением секций

АНДРИАНОВ В. В., доктор. техн. наук, КОПЫЛОВ С. И., инж.

Московский энергетический институт

Параллельное соединение секций катушек, применяемое в силовых сверхпроводниковых обмотках электрических машин и аппаратов, придает им ряд новых полезных свойств, в частности, позволяет упростить конструкцию проводника, повысить надежность работы магнитной системы, а в некоторых случаях заметно снизить расход сверхпроводящего материала.

Такие обмотки представляют особый интерес для применения в магнитных системах индуктивных накопителей энергии, предназначенных для покрытия пиковых нагрузок в мощных энергосистемах и повышения их устойчивости [1—3].

При параллельном включении секции значение полного тока, протекающего в магнитной системе, определяется числом секций, а распределение токов по секциям — соотношением их эффективных индуктивностей. Изменяя размеры секций и зазоров между ними, можно обеспечить равенство токов в них, «транспонировав» проводник в масштабе всей обмотки. Представляется возможным также задать распределение таким образом, чтобы выполнялось условие равнонагруженности секций по току с учетом зависимости критического тока проводника от магнитного поля. При этом расход сверхпроводящего материала при прочих равных условиях оказывается наименьшим.

Значение тока (сечение проводника) может быть выбрано только из технологических соображений или из иных условий, например, из условия уменьшения потерь энергии при разряде. Такой тип обмоток обладает рядом других достоинств, в частности, повышенной устойчивостью относительно импульсных температурных возмущений благодаря возможности индуктивного перераспределения токов по секциям при появлении в одной из них зародыша нормальной фазы. Повышается также надежность обмотки при неконтролируемом переходе одной из секций в нормальное состояние, поскольку при этом запасенная в ней энергия передается в другие остающиеся сверхпроводящими секции обмотки, а при превышении в них критических значений токов энергия выделяется более равномерно по обмотке. Даже в случае необратимого повреждения одной из секций обмотка частично сохраняет свою работоспособность.

Магнитные системы работают в магнитных полях не менее 5 Тл, поэтому с хорошей точностью зависимость критической плотности тока j_c от индукции магнитного поля B описывается выражением [4]:

$$Bj_c = \text{const.} \quad (1)$$

Конструктивная плотность тока $j_{cp} = j_c \lambda k_a$, где λ — коэффициент заполнения обмотки сверхпроводящим материалом; k_a — коэффициент запаса, должна удовлетворять соотношению

$$B_{\max} j_{cp} \approx A = \text{const.}, \quad (2)$$

где $B_{\max}$ — максимальное значение индукции поля в секции.

Рассмотрим основные уравнения, описывающие состояние сверхпроводниковой магнитной системы, состоящей из N параллельно соединенных индуктивно связанных секций. В процессе изменения полного тока распределение токов по секциям

определяется соотношением

$$L \frac{dI}{dt} = U_{\text{ист}}(t) e_1, \quad (3)$$

где $L = \{l_{kn}\}$ — симметричная матрица размером $N \times N$; l_{kk} — индуктивность k -й секции; l_{kn} — взаимная индуктивность k -й и n -й секций, которые вычислены согласно [5] в предположении постоянства магнитной проницаемости по всему объему; $I = \{I_n\}$ — вектор-столбец токов; $U_{\text{ист}}$ — напряжение; $e_1 = \{1\}$ — единичный вектор-столбец; t — время.

Пусть $L^{-1} \{m_{nk}\}$ — матрица, обратная L , тогда из (3)

$$L^{-1} L \frac{dI}{dt} = \frac{dI}{dt} = L^{-1} U_{\text{ист}}(t) e_1. \quad (4)$$

При параллельном соединении секций

$$\frac{dI_{\Sigma}}{dt} = \sum_{k=1}^N \frac{dI_k}{dt}, \quad (5)$$

где I_{Σ} — полный ток магнитной системы. Из (4) и (5) находим

$$\frac{dI_k}{dt} = \frac{dI_{\Sigma}}{dt} \frac{\sum_{n=1}^N m_{nk}}{\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^N m_{in}}. \quad (6)$$

Обозначив через L_{Σ} полную индуктивность магнитной системы, получим

$$L_{\Sigma} \frac{dI_{\Sigma}}{dt} = U_{\text{ист}}(t), \quad (7)$$

тогда с учетом (4) и (6)

$$L_{\Sigma} = \frac{1}{\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^N m_{in}}. \quad (8)$$

Очевидно,

$$I_k(t) = I_k(t=0) + \int_0^t \frac{dI_k}{dt} dt. \quad (9)$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свойства низкотемпературной плазмы и методы ее диагностики/Под ред. Жукова М. Ф. Новосибирск: Наука, 1977.
2. Niemeyer L. Evaporation dominated high arcs in narrow channels.— Tran. IEEE on PAS, 1978, vol. 97, № 3.
3. Kito Y., Miyachi I., Sakakibara T. Influence of radiation loss on the stabilized arc characteristics.— Proc. 3rd Conf. on Gas Discharger.— London: IEE, 1976.

4. Отключение токов в сетях высокого напряжения/Под ред. К. Рагаллера.— М.: Энергоиздат, 1981.

5. Яламова Е. Т. Разработка метода оценки дугостойкости твердых изоляционных материалов для дугогасительных камер малообъемных масляных выключателей: Дис. на степ. канд. техн. наук. Л., 1973. В надзаг.: М-во высш. и сред. спец. образования РСФСР. Лен. политехнический ин-т.

Полагая, что в начале процесса токи во всех секциях равны нулю, получаем

$$I_k(t) = I_\Sigma(t) L_\Sigma \sum_{n=1}^N m_{nk}. \quad (10)$$

Из (9) следует, что такое распределение токов будет только в том случае, если при $t=0$ выполняется соотношение

$$I_k \sum_{i=1}^N m_{in} = I_n \sum_{i=1}^N m_{ik}. \quad (11)$$

Распределение магнитного поля внутри катушек можно определить методом коэффициентов взаимной индукции [6] или расчетом объемных интегралов [7]. Энергию E , запасаемую в магнитной системе находим по формуле

$$E = \frac{L_\Sigma^2 I_\Sigma^2}{2}. \quad (12)$$

Рассмотрим магнитную систему в виде параллельно соединенных коаксиальных круговых катушек прямоугольного сечения с постоянной плотностью намотки провода. Геометрия системы определяется внутренними $[D_k^0]$ и внешними $[D_k^0]$ диаметрами, длинами $[x_k^0]$ и аксиальными координатами $[y_k^0]$, показывающими положение данной секции относительно других. Пусть X — характерный линейный размер системы, зададим ее геометрическую формулу с помощью безразмерных параметров:

$$d_k = \frac{D_k^0}{X}; D_k = \frac{D_k^0}{X}; x_k = \frac{x_k^0}{X}; y_k = \frac{y_k^0}{X}. \quad (13)$$

Пренебрегая дискретностью распределения тока в обмотке и полагая, что она немагнитна и недеформируема¹, можно записать для максимальной индукции магнитного поля $B_k^{\max}$ тока в k -й катушке и запасенной в системе энергии следующие соотношения:

$$B_k^{\max} = (\mu_0 A x)^{1/2} b_k(d_1, D_1, x_1, y_1, \dots, d_N, D_N, x_N, y_N) \quad (14)$$

$$I_k = \kappa (A/\mu_0 X)^{1/2} i_k(d_1, D_1, x_1, y_1, \dots, d_N, D_N, x_N, y_N); \quad (15)$$

$$E = (A X^4) e(d_1, D_1, x_1, y_1, \dots, d_N, D_N, x_N, y_N), \quad (16)$$

где κ — площадь поперечного сечения катушки, приходящаяся на виток; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная; безразмерное поле b_k , ток i_k и энергия e зависят только от геометрии магнитной системы, причем, если $B_k^{\max} j_k = A$, то

$$b_k(d_1, D_1, x_1, y_1, \dots, d_N, D_N, x_N, y_N) i_k(d_1, D_1, x_1, y_1, \dots, d_N, D_N, x_N, y_N) = 1. \quad (17)$$

Чтобы определить геометрию обмотки с равнонагруженными секциями, нужно решить систему из N transcendентных уравнений (17) и дополнительных уравнений, ограничивающих форму магнитной системы.

При расчете полагаем заданными суммарную длину секций и внешний диаметр D и считаем, что зазоры h между ними рав-

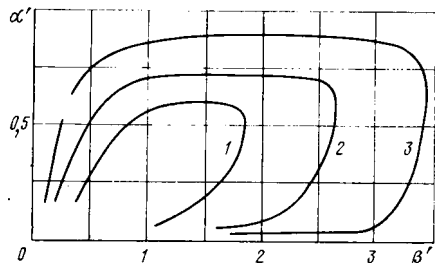


Рис. 1. Линии равной эффективности секционирования ϵ_0 для двенадцатисекционной магнитной системы при $\delta = 0$; 1 — $\epsilon_0 = 1,065$; 2 — $\epsilon_0 = 1,05$; 3 — $\epsilon_0 = 1,035$

ны нулю. Введем относительные размеры, определяющие геометрию системы:

$$\alpha' = \frac{d}{D}; \beta' = \frac{l}{D}, \quad (18)$$

где α' и β' соотносятся с обычно применяемыми безразмерными геометрическими параметрами $\alpha = \frac{D}{d}$ и $\beta = \frac{l}{D}$ как $\alpha' = 1/\alpha$ и $\beta' = \beta\alpha'$.

Для систем с аксиальными секциями, учитывая симметрию и условие

$$\sum_{k=1}^N x_k = \beta', \quad (19)$$

число уравнений для определения параметров равнонагруженных секций сократится до целой части числа $(N-1)/2$ с тем же количеством неизвестных.

На рис. 1 отложены линии равной эффективности секционирования ϵ_0 для $N=12$ в координатах α' и β' ;

$$\epsilon = \epsilon_0 / \epsilon^*, \quad (20)$$

где ϵ_0 — безразмерная энергия секционирования магнитной системы; ϵ^* — безразмерная энергия эквивалентной обмотки.

В качестве эквивалентной принята односекционная система с теми же относительными размерами α' и β' . Очевидно, в ней израсходовано то же количество сверхпроводника, что и в секционированной системе.

На рис. 3 отложены линии, соответствующие равному количеству запасенной энергии на единицу объема материала для односекционной системы.

Можно отметить, что с увеличением α' количество запасенной энергии на единицу объема материала односекционной системы растет, а эффективность секционирования ϵ_0 уменьшается. С увеличением β' эффективность секционирования ϵ_0 уменьшается, так как распределение магнитного поля в осевом направлении становится более равномерным, а количество запасенной энергии на единицу объема материала для односекционной системы растет.

Выше для простоты анализа размеры зазоров h полагались равными нулю. Реальные обмотки, как правило, создаются с зазорами конечной величины с тем, чтобы обеспечить необходимые по условиям электрической прочности и охлаждения промежутки между секциями. Процедура расчета секционированной системы с зазорами в целом та же. В число безразмерных геометрических параметров вводятся относительный размер зазора

$$\delta = h/D. \quad (21)$$

На рис. 2 представлены зависимости суммарного повышения энергоемкости за счет секционирования при наличии зазоров

$$\epsilon = e/\epsilon^*, \quad (22)$$

где e — безразмерная энергия секционированной системы с зазорами, от параметра β' для различного числа секций. Можно отметить незначительность влияния параметров α' (кривые 1, 2 и 3 для четырехсекционной системы) и рост энергоемкости системы с увеличением числа секций, причем вклад каждого последующего увеличения числа секций падает (кривые 2, 4 и 5).

При малых δ с увеличением расстояний h плотность энергии в зазорах падает медленнее, чем увеличивается размер зазора, так что энергоемкость системы в целом увеличивается и проходит через плоский максимум при определенном, зависящем от параметра β' значении $\delta_{\text{опт}}$. С ростом h вклад в энергоемкость системы объема промежутков между секциями падает. Физически это обстоятельство можно объяснить тем, что при небольших зазорах между секциями концентрация энергии магнитного поля не изменяется, а объем пространства, где сосредоточена энергия магнитного поля, увеличивается. На рис. 2 показана также зависимость $\delta_{\text{опт}}$ от β' . С уменьшением относительной длины системы β' вклад энергии магнитного поля в зазорах растет, и максимум сдвигается в сторону больших δ . При изменении числа секций N значение $\delta_{\text{опт}}$, как показывают расчеты, изменяется:

$$\frac{\delta_{\text{опт}}(N_1)}{\delta_{\text{опт}}(N_2)} \approx \left(\frac{N_2 - 1}{N_1 - 1} \right)^{1/4}. \quad (23)$$

Как видно из рис. 2, энергоемкость ϵ при $\beta' > 0,2$ составляет $1,05 \div 1,1$, заметно увеличиваясь при уменьшении относительной длины системы, и достигает $1,3$ при $\beta' \approx 0,1$.

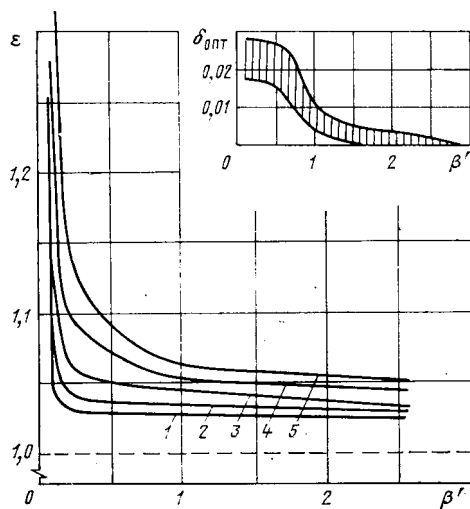


Рис. 2. Зависимости суммарного повышения энергоёмкости за счет секционирования при наличии зазоров $\delta = \delta_{\text{опт}}$: 1 — $N = 4$; $\alpha' = 0,9$; 2 — $N = 4$; $\alpha' = 0,7$; 3 — $N = 4$; $\alpha' = 0,5$; 4 — $N = 8$; $\alpha' = 0,7$; 5 — $N = 12$; $\alpha' = 0,7$. В правом верхнем углу рисунка дана зависимость $\delta_{\text{опт}} = f(\beta')$ для $N = 8$

Радиальное секционирование часто используется для повышения индукции магнитного поля, генерируемой сверхпроводниковыми соленоидами при их фиксированной геометрии, либо для уменьшения при заданном значении индукции магнитного поля расхода сверхпроводника [8]. При этом изменение плотности тока в секциях обеспечивается раздельным возбуждением их от независимых источников либо секции наматываются проводниками, содержащими различное количество сверхпроводящего материала, уменьшающееся с уменьшением локальной индукции магнитного поля.

При параллельном включении концентрических секций их размеры подбираются таким образом, чтобы распределение токов по секциям соответствовало условию (2). Расчет таких систем при отсутствии зазоров между секциями приводится при условии (19), преобразованном так:

$$\sum_{k=1}^N y_k = \frac{1}{2} (1 - \alpha'). \quad (24)$$

Число уравнений для определения параметров секционирования и количество неизвестных в этом случае составляет $N-1$. На рис. 3 изображены зависимости параметра

$$\epsilon_{r0} = \frac{e_{r0}}{e}, \quad (25)$$

где e_{r0} — безразмерная энергия секционированной системы от α' .

Эффективность радиального секционирования существенно выше, чем при разбиении системы на чередующиеся секции, так как изменение индукции магнитного поля в радиальном направлении внутри системы значительно больше, чем в аксиальном направлении. Значение ϵ_{r0} растет при увеличении числа секций, а относительная эффективность увеличения числа секций падает достаточно быстро. Можно отметить, что эффективность секционирования ϵ_{r0} уменьшается с увеличением α' , а количество запасенной энергии на единицу объема материала в односекционной системе растет, что отмечено на рис. 3. Интересным представляется то обстоятельство, что параметр эффективности секционирования при $\beta' > 1,25$ практически не зависит от относительной длины системы (рис. 4), поэтому расчет для таких секционированных систем может выполняться как для бесконечно длинных соленоидов.

При исследовании влияния концентрических зазоров конечной толщины h_r между секциями на эффективность секционирования безразмерный зазор удобно представить в виде:

$$\delta_r = \frac{2h_r}{D-d} = \frac{2}{1-\alpha'} \frac{h_r}{D}. \quad (26)$$

В качестве эквивалентной системы с ϵ_{r0} целесообразно использовать секционированную систему с тем же внешним

диаметром D и длиной, т. е. с одинаковым значением β' , использующую то же количество проводника. При этом, очевидно, внутренние диаметры секций и параметр α' системы с $\delta_r \neq 0$ и эквивалентной системы не совпадают, и условие (24) приобретает вид:

$$\sum_{k=1}^N y_k + \frac{1}{2} (N-1) \delta_r (1 - \alpha') = \frac{1}{2} (1 - \alpha'). \quad (27)$$

Характер влияния концентрических зазоров между секциями на эффективность секционирования системы аналогичен характеру влияния зазоров на эффективность секционирования системы чередующимися цилиндрическими секциями. На рис. 5 показана зависимость $\delta_{r\text{опт}} (1 - \alpha')$ от β' . При изменении числа секций N значение $\delta_{r\text{опт}}$, как показывают расчеты, изменяется по (23). На рис. 5 представлены также зависимости суммарного повышения энергоёмкости за счет секционирования при наличии зазоров

$$\epsilon_r = \frac{e_r \delta}{e}, \quad (28)$$

где $e_r \delta$ — безразмерная энергия системы с зазорами, от параметра α' для $N=2$. При постоянном параметре α' вклад энергии магнитного поля в зазорах растет с увеличением относительной длины системы β' .

Из вышеизложенного следует, что секционирование сверхпроводниковых систем с параллельным включением секций позволяет не только существенно снизить требуемую токонесущую способность проводника и тем самым обеспечить решение технологических вопросов и уменьшить стоимость системы.

Разбиения сверхпроводниковых обмоток на секции и оптимизация размеров секций с учетом зависимости критического

Рис. 3. Эффективность радиального секционирования при $\delta_r = 0$: 1 — $N = 2$, $\beta' = 0,2$; 2' — $N = 3$, $\beta' = 0,2$; 3 — $N = 4$, $\beta' = 0,2$; 1' — $N = 2$, $\beta' = 1$; 2' — $N = 3$, $\beta' = 1$; 3' — $N = 4$, $\beta' = 1$. В правом верхнем углу рисунка отложены линии, имеющие равное количество запасенной энергии на единицу объема материала e^I для односекционной магнитной системы, причем $e^I_1 > e^I_2 > e^I_3$

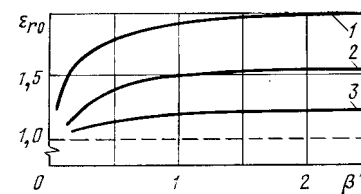
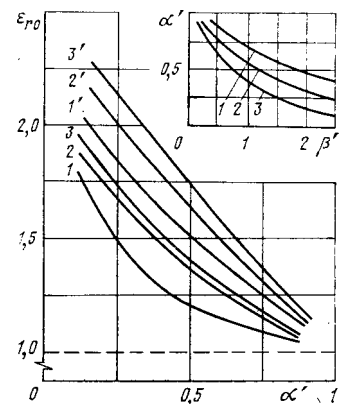
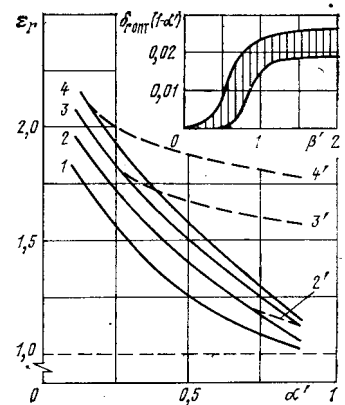


Рис. 4. Эффективность радиального секционирования при $\delta_r = 0$, $N = 2$: 1 — $\alpha' = 0,2$; 2 — $\alpha' = 0,5$; 3 — $\alpha' = 0,8$

Рис. 5. Влияние на энергоёмкость магнитной системы наличия и размеров концентрических зазоров для $N = 2$: 1 — $\delta_r = 0$, $\beta' = 0,25$; 2 — $\delta_r = 0$, $\beta' = 0,5$; 3 — $\delta_r = 0$, $\beta' = 1$; 4 — $\delta_r = 0$, $\beta' = 2$; 2' — $\delta_r = \delta_{r\text{опт}}$, $\beta' = 0,5$; 3' — $\delta_r = \delta_{r\text{опт}}$, $\beta' = 1$; 4' — $\delta_r = \delta_{r\text{опт}}$, $\beta' = 2$. В правом верхнем углу рисунка дана зависимость $\delta_{r\text{опт}} (1 - \alpha') = f(\beta')$ для $N = 2$



тока проводника от индукции магнитного поля позволяет применительно к магнитным системам индуктивных накопителей заметно уменьшить количество сверхпроводящего провода. В этом отношении наиболее эффективно использование радиального секционирования.

Важным является то обстоятельство, что экономия сверхпроводника в секционированных соленоидальных системах тем больше, чем менее оптимальна конфигурация обмотки в целом. Таким образом, если геометрические параметры соленоидальных магнитных систем выбраны неоптимальными в смысле расхода проводника из соображений, например, минимизации массы и объема всех элементов накопителя, количество проводника может быть уменьшено до величины, достаточно близко соответствующей оптимальной конфигурации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ferrier M. Stockage d'énergie dans un enroulement supraconducteur. — Low Temperatures and Electric Power. — Oxford: Pergamon Press, 1970.

2. Андрианов В. В. и др. Разряд сверхпроводящего накопителя на инверторный преобразователь. — ДАН СССР, 1971, т. 196, № 2.
3. Boom R. W. Superconducting energy storage for diurnal use by electric utilities. Trans. IEEE on Magnetic, 1981, vol. 17, № 1.
4. Kim R. W., Hemstead C. F., Strnad A. R. Critical persistent current in hard superconductors. — Phys. Rev. Lett., 1962, vol. 9, № 7.
5. Калантарев П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивных систем. — Л.: Энергия, 1970.
6. Карасик В. О. Физика и техника сильных магнитных полей. — М.: Наука, 1964.
7. Глебов И. А., Лаверик Ч., Шахтарин В. Н. Электрофизические проблемы использования сверхпроводимости. — Л.: Наука, 1980.
8. Зенкевич В. Б., Сычев В. В. Магнитные системы на сверхпроводниках. — М.: Наука, 1972.

[16.02.83]

УДК 621.313.322-81:537.312.62.001.2

Выбор размеров седлообразной сверхпроводниковой обмотки возбуждения турбогенератора

ХУТОРЕЦКИЙ Г. М., ВАРШАВСКИЙ В. Д., ПРАЗДНИКОВ В. И.

Ленинград

Сверхпроводниковая обмотка возбуждения (СПОВ) большинства опытных и модельных турбогенераторов выполнена с модульными катушками. В настоящее время в связи с проектированием и подготовкой производства более мощных турбогенераторов со сверхпроводниковыми обмотками повысился интерес к седлообразным обмоткам. При проектировании таких генераторов возникает необходимость в оптимальном определении формы и конструктивного исполнения СПОВ. В ряде работ [1, 2] были реализованы различные алгоритмы оптимального выбора конфигурации и электромагнитных нагрузок СПОВ. В этих работах на основании аналитического расчета магнитного поля были решены задачи оптимизации СПОВ с параллельными пазами в поперечном сечении без учета лобовых частей.

В статье производится выбор геометрических размеров СПОВ седлообразной формы с учетом пространственной структуры магнитного поля как в пазовой, так и в лобовых частях СПОВ. При этом задача расчета трехмерного магнитного поля решается аналитически с последующим уточнением решения численными методами. Таким образом, в работе реализуется подход, основанный на разбиении задачи на два последовательных расчетных этапа.

Сформулируем задачу в общем виде. Будем считать, что сверхпроводящий материал композитного проводника сохраняет свои функциональные свойства в некоторой области, зависящей от индукции магнитного поля B , плотности тока j и абсолютной температуры T для данного участка СПОВ, т. е. полагая $T=T_0=\text{const}$, получаем достаточное условие нормальной работы СПОВ в виде

$$j_c = j k_{\text{зап}} = f(B_{\text{max}}), \quad (1)$$

где j_c — критическая плотность тока для данного сверхпроводника в поле с индукцией B_{max} при температуре T_0 ; $k_{\text{зап}}$ — коэффициент запаса по току ($k_{\text{зап}} > 1$).

Кроме того, при выборе основных габаритов машины будем полагать определенными (см. рис. 1) радиус расточки сердечника статора R , активную длину l , расстояние между торцевыми щитами L . На основании механического расчета и конструкции элементов крепления обмотки ротора будем считать заданными границы изменения наружного r_2 и внутреннего r_1 радиусов СПОВ. При этих ограничениях и заданном уровне индукции в рабочем объеме генератора требуется определить конфигурацию и основные геометрические размеры СПОВ, обеспечивающие максимум $k_{\text{зап}}$.

Рассмотрим влияние изменения γ , т. е. отношения обмотанной поверхности ко всей поверхности ротора, на $k_{\text{зап}}$ при оп-

ределенной и неизменной высоте катушек СПОВ. На данном этапе расчета магнитное поле в исследуемой области определяется с помощью аналитических выражений, полученных при решении уравнений Лапласа и Пуассона относительно векторного магнитного потенциала A . Задача решается в полярной системе координат для поперечного сечения генератора в предположении его бесконечной длины, при этом магнитная проницаемость сердечника статора принимается равной бесконечности [3].

Для сравнительного анализа вариантов конструкции СПОВ расчеты были выполнены при заданном и неизменном номинальном значении амплитуды первой гармонической магнитной индукции на расточке статора. Таким образом, для решения задачи оптимизации был определен следующий порядок расчета: задание первой гармоники индукции B_1 на расточке статора;

определение равномерно распределенной плотности тока j_0 в зоне СПОВ, обеспечивающей заданный уровень B_1 ;

определение реальной плотности тока в сверхпроводнике $j = j_0 k_{\text{сп}}$ в предположении, что коэффициент заполнения обмотки сверхпроводником $k_{\text{сп}} = \text{const}$;

определение максимальной индукции B_{max} в зоне СПОВ. В данном случае зона обмотки аппроксимируется сеткой, в узлах которой рассчитывается индукция, а затем выбирается ее максимальное значение;

расчет коэффициента запаса по току (1).

При относительных размерах: $R=1$; $r_1=0,329$; $r_2=0,413$; $L=3$; $l=1,43$ и первой гармоники индукции $B_1=1,04$ Тл для значений $\gamma=6/9$; $7/9$; $8/9$; $9/9$ были получены соответственно значения $k_{\text{зап}}=1,39$; $1,47$; $1,35$; $1,20$. Отсюда видно, что наилучший коэффициент $k_{\text{зап}}$ получается при $\gamma \approx 7/9$. Здесь, однако, не учтено влияние лобовых частей, так как максимальное значение индукции в них при той же плотности тока, что и в пазовой части, может быть больше.

На рис. 2 приведены результаты исследования влияния ширины вылета лобовой части b на значение максимальной индукции в зоне СПОВ (если $\gamma=7/9$) при расчете магнитного поля в декартовой системе координат для продольного сечения турбогенератора и прежних допущениях (см. рис. 1). Из рисунка видно, что существует такое критическое значение ширины, меньше которого при расчете $k_{\text{зап}}$ нужно определять B_{max} в лобовой части СПОВ.

Отметим, что совпадение значений B_{max} в пазовой и лобовых зонах СПОВ приближенно соответствует естественной

ширине вылета лобовой части $\gamma \frac{r_2}{2}$,

С учетом последнего рассмотрим вариацию размеров максимума трех катушек СПОВ только в пазовой части, т. е. определим значения h_i , γ_i , $i=1, 2, 3$, при которых $k_{зап} \rightarrow \max$ и выполняется ограничение $\sum h_i = r_2 - r_1$. Эта задача была решена

методом линейного программирования со скользящими границами [4]. Метод заключается в следующем. По каждой из независимых переменных назначаются некоторые начальные диапазоны $x_{i\min}$, $x_{i\max}$, в пределах которых решается задача линейного программирования. Целевая функция и функция ограничения предполагаются линейными и записываются следующим образом:

$$k_{зап} = k_{зап0} + (k_{зап1} - k_{зап0})x_1 - (k_{зап2} - k_{зап0})x_2 + \dots + (k_{зап6} - k_{зап0})x_6;$$

$$(\Sigma h) = (\Sigma h)_0 + [(\Sigma h)_1 - (\Sigma h)_0]x_1 + [(\Sigma h)^2 - (\Sigma h)_0]x_2 + \dots + [(\Sigma h)_6 - (\Sigma h)_0]x_6.$$

Значение переменных x_i определяются как

$$x_i = \frac{x_i - x_{i\max}}{x_{i\max} - x_{i\min}},$$

где x_i — значения независимой переменной, $i = 1, 2, 3, \dots, 6$.

Решая задачу линейного программирования, получаем вектор значений x_i и уменьшаем диапазон $[x_{i\min}, x_{i\max}]$ по следующему правилу. Если $x_i \leq 0,5$, то верхняя граница снижается на величину $k_1(x_{i\max} - x_{i\min})$; если $x_i > 0,5$, то нижняя граница увеличивается на ту же величину. Затем задача решается в новых диапазонах и т. д., в результате чего область поиска постепенно сужается. В настоящей работе используется подобранный эмпирически коэффициент уменьшения $k_1 = 0,25$. Кроме того, производится дополнительный анализ. Если одна из границ какого-либо диапазона после двух шагов цикла остается неизменной, диапазон расширяется за эту границу на величину $k_2(x_{i\max} - x_{i\min})$. Коэффициент k_2 также подбирается эмпирически; в работе он принят равным 0,3. Уменьшение диапазона происходит после каждого применения симплекс-метода, а увеличение — через одно.

Алгоритм был реализован в виде программы на языке ФОРТРАН-4. Для выполнения расчетов на ЭВМ требовалось 8 килослов оперативной памяти.

При значениях $k_1 = 0,25$ и $k_2 = 0,3$ после 40 циклов диапазон изменений независимых переменных сокращался до 1 % первоначального значения. Для решения задачи с такой точностью требовалось 30 минут машинного времени.

На рис. 3 показан пример изменения диапазонов значений h_1 и $\gamma_1 \frac{\pi}{2}$ в зависимости от циклов в процессе поиска, а также

форма поперечного сечения СПОВ, в которой для простоты слои обмотки изображены не секторами, а прямоугольниками. Для такой обмотки $k_{зап} = 1,59$.

Исходя из требований к конструкции СПОВ и на основании выполненного расчета можно предложить для уточнения расчета численный метод в продольном и поперечном сечениях генератора вариант двухслойной обмотки с $\gamma_1 = 6/9$, $\gamma_2 = 8/9$, $h_2 = 3/4$ ($r_2 - r_1$). Отметим, что для такой обмотки определенный на данном расчетном этапе $k_{зап}$ на 7 % лучше, чем для самой хорошей с этой точки зрения обмотки с постоянной высотой катушек.

Дальнейшего увеличения $k_{зап}$ практически можно достичь лишь уменьшением тока сверхпроводящей шины. В связи с этим для уточнения расчета численным методом была принята модель СПОВ с увеличенным приблизительно на 20 % значением Σh_i и рекомендуемым по результатам первого расчетного этапа значением γ .

Задача расчета магнитного поля сверхпроводящего турбогенератора с учетом реальной геометрии катушек СПОВ была сформулирована относительно единственной осевой составляющей векторного магнитного потенциала A в полярной системе координат:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(v r \frac{\partial A}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{v}{r} \frac{\partial A}{\partial \varphi} \right) = -j, \quad (2)$$

где j — плотность тока в СПОВ; $v = \frac{1}{\mu}$; μ — магнитная проницаемость материала. Для решения задачи был использован ко-

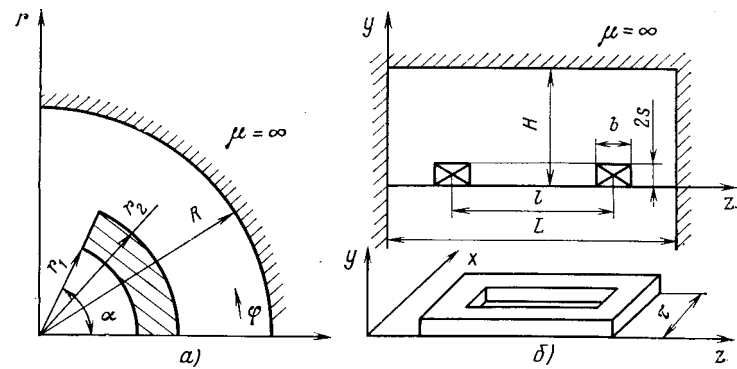


Рис. 1. Расчетная область: а — поперечное сечение КТГ; б — продольное сечение спрямленной модели КТГ

Рис. 2. Влияние ширины вылета лобовой части СПОВ на значение максимальной индукции в зоне этой обмотки

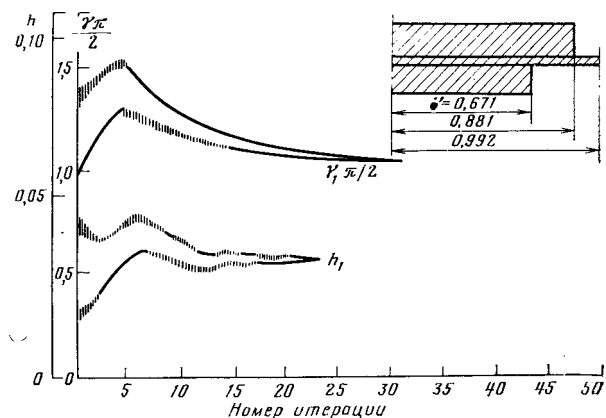
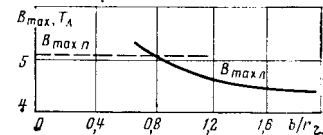


Рис. 3. Вариация независимых переменных в процессе поиска оптимального решения

нечно-разностный метод. Расчетная область была аппроксимирована сеткой с неравномерными шагами по радиальной и угловой координатам и числом узлов 1500.

Граничные условия имели следующий вид. Из соображений симметрии поля $A=0$ при $\varphi = \pi/2$ и $\partial A / \partial \varphi = 0$ при $\varphi = 0$. Искомая область ограничивалась внешней границей ферромагнитного экрана, на которой было задано граничное условие $\partial A / \partial \varphi = 0$. Поскольку насыщение ферромагнитного экрана практически не сказывается на распределении магнитного поля в зоне СПОВ, магнитная проницаемость материала сердечника статора была принята постоянной и равной $1000 \mu_0$. Плотность тока в катушках СПОВ была задана равномерно распределенной по сечению паза.

Система конечно-разностных линейных уравнений, аппроксимирующая уравнение (2), была решена достаточно эффективным методом последовательной верхней релаксации [5]. В расчете был использован близкий к оптимальному значению коэффициент уравнения сходимости.

Программа расчета была составлена на алгоритмическом языке ФОРТРАН-4 и потребовала для реализации на ЭВМ 24 килослова оперативной памяти. На выполнение 100 линейных итераций требовалось меньше двух минут машинного времени. При этом максимальный остаток потенциала уменьшался на шесть порядков.

Магнитное поле модели сверхпроводящего турбогенератора рассчитывалось для нескольких вариантов конструктивного исполнения катушек СПОВ, близких к оптимальному варианту по результатам предыдущего расчетного этапа.

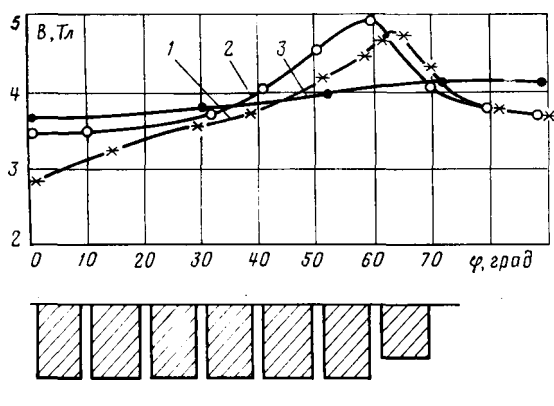


Рис. 4. Распределение модуля индукции на внутреннем радиусе СПОВ

На рис. 4 в качестве примера приведено распределение магнитного поля вдоль угловой координаты на расстоянии $\Delta r = \frac{1}{8}(r_2 - r_1)$ от внутреннего радиуса обмотки возбуждения (кривая 1). На этом же рисунке для сравнения приведены аналогичные зависимости распределения индукции для тока возбуждения, протекающего по секторной обмотке (кривая 2), и от его первой гармонической (кривая 3). Расчеты для трех сравниваемых представлений СПОВ производились методом сеток, причем уровень дискретизации расчетной области и точность решения системы конечно-разностных уравнений были примерно одинаковыми.

Таким образом, расхождения в результатах расчета определяются в основном полнотой учета реальной геометрии СПОВ.

Как и следовало ожидать, результаты расчета магнитного поля СПОВ, представленной в виде сектора и в виде дискретных катушек, отличаются незначительно. В области максимальных значений B в зоне СПОВ расхождение результатов достигает 5%. Так, для одного из рассматриваемых вариантов конструкции СПОВ, состоящей из семи катушек, шесть из которых имеют постоянную высоту, а одна укорочена на $\frac{1}{4}$ высоты, на основе численного расчета были получены $B_{\max} = 4,65$ Тл и $k_{\text{зап}} = 2,12$.

Для учета реальной геометрии лобовых частей СПОВ и торцевой зоны были выполнены расчеты магнитного поля в продольном сечении модели турбогенератора при помощи скалярного магнитного потенциала аналогично [3].

Расчеты показали, что в рассматриваемой конструкции СПОВ не наблюдается увеличения магнитного поля в зоне лобовых частей обмотки возбуждения по сравнению с пазовой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаврилов Р. В. Алгоритм выбора оптимальных параметров сверхпроводящей обмотки возбуждения. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1979, № 6.
2. Барабаш Э. В. Выбор оптимальных геометрических размеров и расчет поля катушки магнитной системы криотурбогенератора ускоренным графоаналитическим методом. — Труды ВНИИЭ, т. 52, 1977.
3. Варшавский В. Д. Влияние нелинейных свойств ферромагнитного сердечника на поле в торцевой зоне электрических машин. — В кн.: Моделирование и расчет магнитных полей и электродинамических усилий в электрических машинах. — Омск, 1979.
4. Зайчик В. М. Применение линейного программирования при оптимизации расчета асинхронных машин. — Электричество, 1979, № 12.
5. Erdelyi E. A., Fuchs E. F. Nonlinear magnetic field analysis of d. c. machines. Part. I. — Trans. IEEE on PAS, 1970, vol. 89, № 7.

[22 02.82]

УДК 621.313.322-82.045.012.8.001.24

О смещении напряжения нейтрали в обмотках машин переменного тока

АНАНЯНЦ С. С., канд. техн. наук, ГУЩИН Е. В., инж., ПИНСКИЙ Г. Б.,
канд. техн. наук, ШАМИН В. Г., инж.

На одной ГЭС при пуске первых агрегатов была обнаружена существенная асимметрия фазных напряжений, следствием чего явилось смещение напряжения нейтрали генераторов (до 0,054 % $U_{\text{ф}}$), причем на первую гармонику в составе этого напряжения приходилось 88 %, а на третью — 38 %. Наличие напряжения смещения нейтрали приводило к необходимости заглублять или вообще выводить из работы защиту от замыкания на землю генераторов, что недопустимо с точки зрения обеспечения их нормальной эксплуатации.

С целью выявления причин асимметрии фазных напряжений были проведены экспериментальные и теоретические исследования, основные результаты которых изложены в настоящей статье.

Анализ полученных результатов исследований показал, что асимметрия фазных напряжений имеет одинаковый характер на всех генераторах этой серии и вызвана особенностями схемы соединения статорной обмотки гидрогенератора.

В связи с этим было проведено изучение схемы обмотки статора генераторов и теоретический анализ ее особенностей, позволивший установить истинную причину возникновения асимметрии фазных напряжений и устранить ее.

Обмотка статора генератора характеризуется следующими параметрами: число фаз $m=3$, число полюсов $2p=104$, число пазов на полюс и фазу $q=2$, число эффективных проводников в пазу $Sl=2$, число параллельных ветвей в фазе $a=2$, частичные шаги $y_1=5$ и $y_2=7$, чередование катушечных групп равномерное.

Угол между векторами э. д. с. стержней обмотки статора, принадлежащих соседним пазам, $\alpha = \pi/mq = \pi/6$.

Так как параллельные ветви обмотки выполнены сосредото-

ченными, каждая из них охватывает половину окружности машины. Для соединения всех стержней полуфазы, осуществляется четыре обхода в каждой ветви — по числу стержней одного слоя, принадлежащих одной фазе под парой полюсов ($2p$). Поэтому в каждой параллельной ветви имеется три пемьки, каждая из которых необходима для соединения групп стержней одного обхода. Одна такая группа содержит число стержней $n=52$, из которых половина стержней верхнего слоя, а другая половина — нижнего. При этом векторы э. д. с. верхних стержней одного обхода синфазны и повернуты относительно векторов э. д. с. нижних стержней того же обхода угол $\beta = \pi - \alpha y_1 = \pi/6$.

Таким образом, векторы всех последовательно соединенных при одном обходе стержней обмотки (числом $n/2$) синфазны и могут быть представлены одним результирующим вектором.

Поскольку таких обходов в каждой полуфазе четыре, результирующий вектор фазного напряжения представляет собой сумму четырех векторов, которая образуется двумя синфазными парами векторов повернутых относительно друг друга на угол (рис. 1). Тот факт, что имеется всего две разновидности векторов в фазе, объясняется тем, что при $q=2$ в каждый момент времени фазы, в которых размещены стержни данной фазы, занимают одно и то же положение относительно полюсов разной полярности.

Последовательность сложения четырех векторов в фазе определяется принятым порядком обхода на электрической схеме соединений. Получаемая в результате такого сложения величина и фаза результирующих фазных э. д. с. в принципе не зависят от последовательности обхода [1]; с точки зрения электромагнитных процессов это допустимо, однако с точ-

зрения электрических процессов, как показал анализ, оно может привести к асимметрии фазных э. д. с.

Особенностью схемы обмотки в данном случае явился разный порядок обхода обмотки в фазе C по сравнению с двумя другими фазами. В итоге была получена симметричная звезда фазных э. д. с., но при наличии несимметрии напряжений фаз. После присоединения их по схеме звезды возникает смещение напряжения нейтрали.

На рис. 1 представлена векторная диаграмма фазных э. д. с. $\{E_A, E_B \text{ и } E_C\}$. Первые две фазы образованы совершенно идентично: составляющие их векторы 1, 2, 3 и 4 сложены в одной и той же последовательности. Поэтому и угол между любой парой векторов, отстоящих по схеме от начала этих фаз, составляет, как и угол между э. д. с. фаз, 120° .

В отличие от фаз A и B в начале фазы C включены части обмотки, соответствующие векторам 3 и 4, а уже затем — 1 и 2. В результате угол между векторами одинаково удаленных от нейтрали стержней в фазе C и, например, в фазе A не равен 120° , а, как видно из диаграммы на рис. 1, изменяется от 90 до 120° ; для фаз B и C он изменяется от 150 до 120° .

Поэтому звезда э. д. с. для половины стержней фаз A, B и C представляет собой уже несимметричную систему.

В соответствии с векторным расположением потенциала по обмотке емкостные токи фаз $[i_A, i_B \text{ и } i_C]$ (рис. 2) могут быть представлены как суммы двух составляющих, обусловленных одна — векторами э. д. с. 1 и 2, другая — 1, 2, 3 и 4:

$$\bar{i}_A = \bar{i}_{A1} + \bar{i}_{A2}; \bar{i}_B = \bar{i}_{B1} + \bar{i}_{B2}; \bar{i}_C = \bar{i}_{C1} + \bar{i}_{C2}.$$

Поскольку модули векторов э. д. с. частей фаз обмотки OA', OB' и OC' одинаковы, а емкость стержней ее одна и та же, очевидно, что емкостные токи через изоляцию этих частей обмотки равны между собой по величине: $|\bar{i}_{A1}| = |\bar{i}_{B1}| = |\bar{i}_{C1}|$.

Относительно соответствующих э. д. с. векторы этих токов повернуты на $\pi/2$. То же самое касается и емкостных токов через части обмотки $A'A, B'B$ и $C'C$, средние потенциалы которых одинаковы: $|\bar{i}_{A2}| = |\bar{i}_{B2}| = |\bar{i}_{C2}|$. Векторы этих токов также опережают во времени среднее напряжение OK на участках фаз обмотки $A'A, B'B$ и $C'C$ на $\pi/2$.

Примем за единицу э. д. с. половины фазы: $OA' = A'A = E_\phi/2 = E_1 = E_2 = 1$; соответственно емкостные сопротивления полуфаз $[x_{C1} = x_{C2} = 1]$. Тогда средний потенциал $OK = U_{cp}$ на участках фаз обмотки $A'A, B'B$ и $C'C$ (из треугольника OKP) составляет (рис. 1):

$$OK = U_{cp} = \sqrt{(E_1 + 0,5E_2 \cos \alpha)^2 + (0,5E_2 \sin \alpha)^2}. \quad (1)$$

Так как емкостные токи определяются средними потенциалами, то $|\bar{i}_{C1}| = \frac{0,5E_1}{x_{C1}} = 0,5E_1$ и $|\bar{i}_{C2}| = \frac{U_{cp}}{x_{C2}} = U_{cp}$,

суммарный емкостный ток фазы (рис. 2)

$$M_{iC} = OA = |\bar{i}_A| = |\bar{i}_B| = |\bar{i}_C| = \sqrt{(i_{C2} \sin \theta)^2 + (i_{C1} + i_{C2} \cos \theta)^2}, \quad (2)$$

а угол поворота емкостного тока всей фазы относительно вектора тока в начале фазы в соответствии с диаграммой на рис. 2

$$\gamma = \arctg \frac{i_{C2} \sin \theta}{i_{C1} + i_{C2} \cos \theta}, \quad (3)$$

где $\theta = \alpha - \arcsin \left(\frac{E_1}{U_{cp}} \right) \sin \alpha$ и определяется по построению

рис. 1); $\theta = 90 - [(90 - \alpha) + \xi] = \alpha - \xi$, а из треугольника OKP (по теореме синусов) $\xi = \arcsin \left(\frac{E_1}{U_{cp}} \right) \sin \alpha$.

Таким образом, емкостные токи фаз оказываются сдвинутыми на различные углы: в фазах A и B на $90^\circ + \alpha$, в фазах A и B на $90^\circ + 2\gamma$ и в фазах B и C на $180^\circ - \alpha - 2\gamma$.

Несимметрия емкостных токов фаз при соединении последних в звезду приводит к появлению тока смещения, который в известной мере тождествен составяющей нулевой последовательности метода симметричных составляющих:

$$\bar{i} = \frac{1}{3}(\bar{i}_A + \bar{i}_B + \bar{i}_C), \quad (4)$$

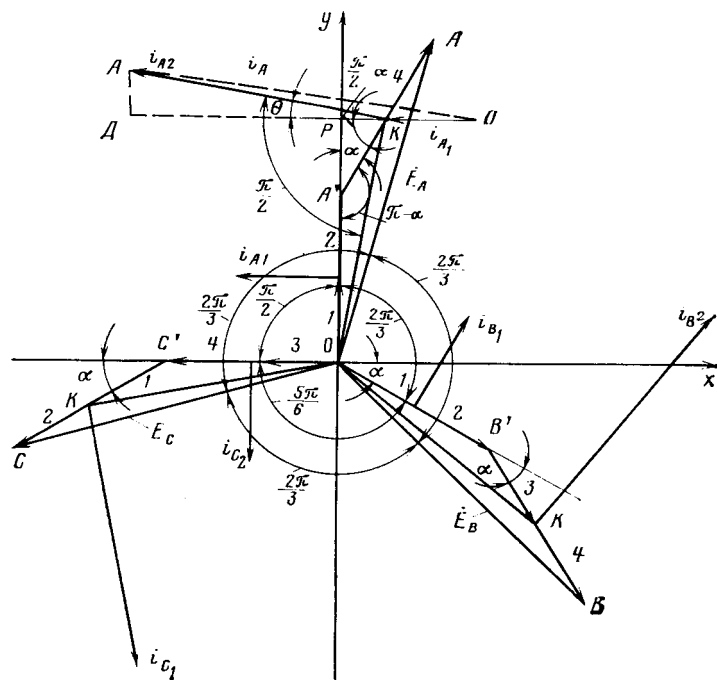


Рис. 1. Векторная диаграмма фазных э. д. с. гидрогенератора

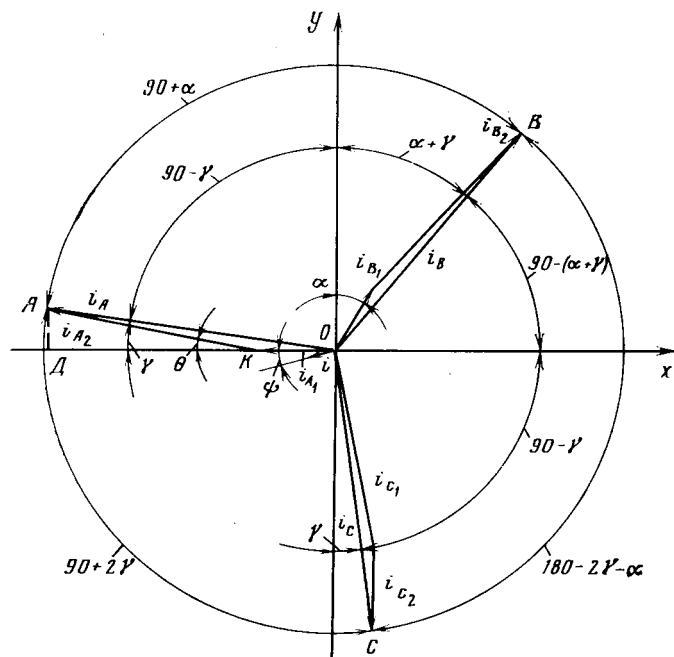


Рис. 2. Векторная диаграмма емкостных токов фаз гидрогенератора без учета тока смещения

модуль которого может быть вычислен через суммы проекций всех трех токов (рис. 2)

$$|\bar{i}| = \frac{1}{3} \sqrt{(\sum x)^2 + (\sum y)^2}, \quad (5)$$

а его фаза

$$\psi = \arctg \frac{\sum y}{\sum x}, \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} \sum x &= -M_{iC} \cos \gamma + M_{iC} \cos [90^\circ - (\alpha + \gamma)] + M_{iC} \cos (90^\circ - \gamma); \\ \sum y &= M_{iC} \cos (90^\circ - \gamma) + M_{iC} \cos (\alpha + \gamma) - M_{iC} \cos \gamma \end{aligned}$$

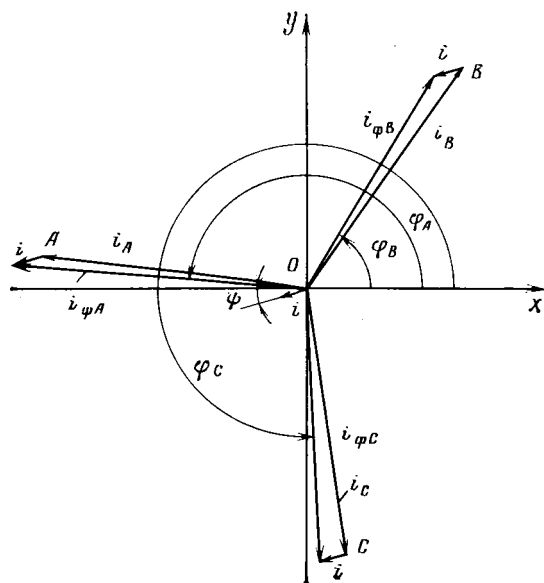


Рис. 3. Векторная диаграмма емкостных токов фаз гидрогенератора при учете тока смещения

$$\text{или } \Sigma x = M_{iC} [\sin \gamma - \cos \gamma + \sin (\alpha + \gamma)];$$

$$\Sigma y = M_{iC} [\sin \gamma - \cos \gamma + \cos (\alpha + \gamma)].$$

Тогда

$$\psi = \arctg \frac{\sin \gamma - \cos \gamma + \cos (\alpha + \gamma)}{\sin \gamma - \cos \gamma + \sin (\alpha + \gamma)}.$$

Произведя соответствующие преобразования, получим выражение для модуля и фазы тока смещения:

$$|\bar{i}| = \frac{M_{iC}}{3} \sqrt{3 - 2 [\sin 2\gamma + \cos (\alpha + 2\gamma) + \sin \alpha]}; \quad (7)$$

$$\psi = \arctg \frac{\operatorname{tg} \gamma \sin^2 \left(45^\circ - \frac{\alpha}{2} \right) - \sin^2 \frac{\alpha}{2}}{\operatorname{tg} \gamma \cos^2 \frac{\alpha}{2} - \sin^2 \left(45^\circ - \frac{\alpha}{2} \right)}. \quad (8)$$

Зная значение тока смещения, можно определить напряжение несимметрии

$$U_{nc} = i \Sigma x_C, \quad (9)$$

где Σx_C — суммарное емкостное сопротивление обмотки статора.

Фактически емкостные токи фаз с учетом смещения напря-

жения нейтрали могут быть определены путем сложения соответствующих векторов (рис. 3):

$$\bar{i}_{\phi A} = \bar{i}_A + \bar{i}; \quad \bar{i}_{\phi B} = \bar{i}_B + \bar{i}; \quad \bar{i}_{\phi C} = \bar{i}_C + \bar{i}. \quad (10)$$

Модули и аргументы векторов емкостных токов фаз для слу-

чая $\alpha = 30^\circ$, $q = 2$ составляют: $|\bar{i}_{C1}| = 0,5$; $|\bar{i}_{C2}| = 1,455$; $U_{cp} = 1,455$; $\theta = 10^\circ$; $M_{iC} = 1,95$; $\gamma = 7,5^\circ$; $|i| = 0,17$; $\psi = 15^\circ$; $|i_{\phi A}| = 2,1$; $\varphi_A = 174,3^\circ$; $|i_{\phi B}| = 1,82$; $\varphi_B = 55,7^\circ$; $|i_{\phi C}| = 1,98$; $\varphi_C = 272,6^\circ$.

Ниже приведены значения напряжений фаз генератора относительно земли и напряжение несимметрии, полученные экспериментально (в числителе) и расчетным путем (в знаменателе):

U_{A3} , кВ	U_{B3} , кВ	U_{C3} , кВ	U_{nc} , В
8,1/8,4	7,5/7,3	7,8/7,9	433/441

Анализ и расчеты позволяют дать рекомендацию по внесению изменений в схему соединения обмотки статора с целью устранения повышенной асимметрии фазных напряжений машины. Сущность этих рекомендаций заключается в симметрировании обмотки в пределах полуфаз OA' , OB' , OC' . Для этого на уже смонтированных генераторах оказалось целесообразным произвести перемену мест групп стержней 1, 2 и 3, 4 фазы C (рис. 1).

После выполнения соответствующих изменений в схеме обмотки и проведения специальных испытаний явления, связанные со смещением напряжения нейтрали машины, были устранены.

Составляющая первой гармонической в напряжении нейтрали генератора фактически была исключена ($U_{ncv} = 4-5$ В), что позволило ввести в нормальную эксплуатацию защиту типа 3ЗГ—1.

Таким образом, при составлении схем обмоток электрических машин рекомендуется, помимо выполнения известных условий симметрии, следить также за тем, чтобы не только результирующие, но и промежуточные э. д. с. (на частях обмотки) были симметричны. Для этого необходимо, чтобы последовательность соединений стержней во всех фазах была идентична [1].

Выводы. 1. Различный порядок соединения стержней в фазах из-за неравномерного распределения емкостных токов приводит к смещению напряжения в нейтрали и, как следствие, к несимметрии фазных напряжений, что недопустимо с точки зрения обеспечения нормальной эксплуатации защиты генераторов от замыкания на землю. Поэтому целесообразно проводить оценку ожидаемой несимметрии напряжений обмотки.

2. Смещение напряжения нейтрали генератора может быть обусловлено не только емкостной несимметрией и несимметрией активных утечек, но также и различным порядком соединения стержней фазы обмоток машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1. Ипатов П. М. Практический способ составления схем волновых обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу. Вестник электропромышленности ВЭП, 1952, № 9.

[02.12.82]

УДК 621.373.015.3.001.24

Синтез параметров генератора импульсов напряжения

ГУБАРЕВ Г. Г., КОНОТОП В. В.

Харьковский политехнический институт

Генераторы импульсов напряжения (ГИН) являются основным оборудованием, используемым при испытании изоляции электрических аппаратов и при проведении ряда физических исследований [1—3].

В настоящее время на повестку дня поставлен вопрос о сооружении ГИН предельных параметров напряжением до 16 МВ [4]. Проектирование ГИН предельных параметров, с одной стороны, требует решения задачи анализа схем генераторов шестого и более высоких порядков, чем это было сделано ранее [3], а с другой, — решения задачи синтеза параметров схемы ГИН, обеспечивающих генерирование импульса напря-

жения с требуемыми амплитудно-временными характеристиками при минимальной энергоемкости. При этом желательно исключить из процесса синтеза участие человека и таким образом решить одну из важнейших задач автоматизированного проектирования высоковольтных импульсных устройств.

Излагаемая в статье методика предназначена для определения оптимальных значений параметров ГИН при использовании схем замещения высоких порядков и формировании на оговоренной нагрузке импульсов напряжения, заданных аналитически [5]. В качестве заданного импульса рассмотрим стандартный грозовой импульс напряжения 1,2/50, удовлетворяю-

ший требованиям ГОСТ 1516.2—78 и описываемый уравнением [6]:

$$U_0(t) = 1,037 U_m [\exp(-0,0147t) - \exp(-2,4689t)], \quad (1)$$

где U_m — максимальное значение заданного напряжения; t — время в микросекундах.

Известно [3], что при формировании импульсов с длительностью фронта микросекундного диапазона в расчетной схеме ГИН нет необходимости учитывать паразитные емкости межступенчатых коммутаторов, нелинейные свойства их межэлектродных промежутков, явление импульсной короны, волновые процессы и некоторые другие эффекты. Математическую модель процесса разряда ГИН (рис. 1) получим в предположении линейности и постоянства параметров элементов, отсутствия в нем волнового процесса, одновременности пробоя межступенчатых коммутаторов, равенства зарядного напряжения и значений параметров однотипных элементов всех ступеней.

Учет в расчетной схеме паразитных параметров ГИН и нагрузки, имеющих постоянные времени, отличающиеся от длительности заданного импульса на три и более порядка, приводит к жесткости системы дифференциальных уравнений (СДУ) математической модели процесса разряда ГИН. В результате этого время решения СДУ методом Рунге — Кутты 4-го порядка на ЦВМ М-222, к примеру, составляет для задачи анализа более одного часа, а реализация задачи синтеза параметров ГИН при этом практически невозможна. С целью сокращения времени интегрирования задачи анализа нами применен системный метод [7, 8].

Опишем переходный процесс в контуре разряда ГИН системой уравнений в матричной форме:

$$\dot{\mathbf{A}}\mathbf{y} = \mathbf{B}\mathbf{u}, \quad (2)$$

где

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -L_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ L_1 & L_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ L_1 & L_3 & L_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ L_1 & L_3 & L_6 & -L_8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_8 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -R_1 & -R_2 & R_2 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -R_1 & -R_3 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -R_1 & -R_3 & -R_6 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -R_1 & -R_3 & -R_6 & R_8 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & -R_4^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} i_1(t) \\ i_3(t) \\ i_6(t) \\ i_8(t) \\ U_1(t) \\ U_5(t) \\ U_7(t) \\ U_8(t) \end{bmatrix}.$$

Введем матрицу $\Phi = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}$ и преобразуем систему уравнений (2) к виду Коши:

$$\dot{\mathbf{y}} = \Phi\mathbf{y} \quad (3)$$

Решение СДУ в отдельных точках дискретизации интервала интегрирования $t_{i+1} = t_i + H_k$ получим по формуле $\mathbf{y}_{i+1} = \Phi(H_k)\mathbf{y}_i$, $i=0, K-1$, где $\mathbf{y}_0^T = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ U_1 \ 0 \ 0 \ 0]$; U_1 — напряжение ГИН; i — номер текущей точки; k — номер интервала с постоянным шагом интегрирования, который от нуля увеличивается на единицу через каждые пять шагов дискретизации, после чего шаг удваивается; K — число точек дискретизации в интервале интегрирования; $\Phi(H_k)$ — матрица перехода системы.

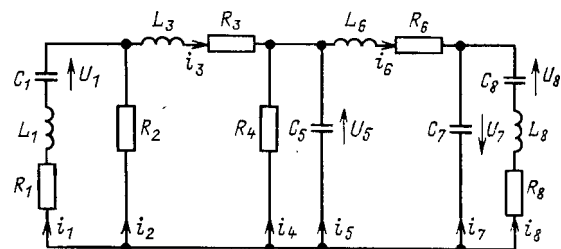
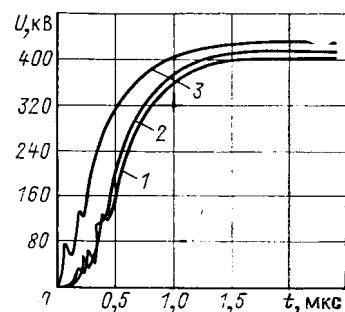


Рис. 1. Расчетная схема разряда ГИН на комплексную нагрузку: C_1 — емкость ГИН в ударе; L_1 — индуктивность элементов (конденсаторов, коммутаторов, ошинок) ступеней ГИН; R_1 — активное сопротивление элементов ступеней ГИН; R_2 — разрядное сопротивление; L_3, R_3 — индуктивность и активное сопротивление демпфирующего резистора; R_4 — зарядное сопротивление; C_5 — паразитная емкость ГИН на землю; L_6, R_6 — индуктивность и активное сопротивление фронтового резистора и проводников, соединяющих ГИН с нагрузкой; C_7 — паразитная емкость нагрузки на землю; C_8, L_8, R_8 — емкость, индуктивность и активное сопротивление нагрузки

Рис. 2. Графики заданного и расчетных импульсов напряжения на нагрузке: 1 — импульс заданного напряжения (1); 2 — расчетный импульс напряжения при реализации параметров ГИН и нагрузки, приведенных в [10]; 3 — расчетный импульс напряжения при синтезированных оптимальных параметрах ГИН



При этом $\Phi(H_k) = \exp(\Phi H_k)$ и вычисляется с помощью представления равномерно сходящимся матричным рядом и рекуррентных соотношений, приведенных в [7]. При введении в программу анализа процесса разряда ГИН реальных значений параметров схемы замещения рис. 1 оказалось, что из-за аварийных остановов при выполнении операций с матрицами реализовать системный метод интегрирования системы (3) крайне сложно. Для предотвращения таких остановов в стандартных процедурах обращения и перемножения матриц выполнено адекватное преобразование математической модели решаемой задачи с применением теории подобия и моделирования [9]. Задавшись независимыми масштабами по напряжению $m_U = 10^{-6}$, по времени $m_t = 10^9$, по емкости $m_C = 10^{10}$, удалось реализовать системный метод интегрирования уравнений (3) на ЦВМ М-222 в режиме расфискации процедур.

Для подтверждения применимости принятой расчетной схемы и используемого метода решения задачи анализа проведем сравнение результатов расчета схемы ГИН, приведенной на рис. 1, с результатами эксперимента и расчета, полученными в [10] для полной многоконтурной схемы замещения с представлением элементов и паразитных параметров всех ступеней.

В эксперименте [10] в качестве нагрузки ГИН использованы емкостный и омический делители напряжения. Значения параметров принятой нами схемы замещения и зарядного напряжения ГИН получены с использованием формул [3]: $C_1 = 25$ нФ; $C_5 = 115$ пФ; $C_7 = 40$ пФ; $C_8 = 1,44$ нФ; $L_1 = 7,5$ мкГн; $L_3 = 5$ мкГн; $L_6 = 2$ мкГн; $L_8 = 3$ мкГн; $R_1 = 1$ Ом; $R_2 = 3750$ Ом; $R_3 = 62,5$ Ом; $R_4 = 15$ кОм; $R_6 = 230$ Ом; $R_8 = 0,001$ Ом; $U_1 = 470$ кВ. Расчетный на емкости C_7 и заимствованные из [10] импульсы напряжения на нагрузке показаны на рис. 2. Полученный нами импульс напряжения правильно и достаточно полно отражает особенности реального импульса на фронте, однако, как видно из рисунка, в решении отсутствует время запаздывания срабатывания ГИН, равное примерно 0,2 мкс. Полученный результат является закономерным, поскольку принятая математическая модель ориентирована на описание процессов в разрядном контуре, а не в самом ГИН. Полученное нами расчетное максимальное значение превышает экспериментальное не более чем на 7 %, а расчетное — не более чем на 4 % [10]. Указанное расхождение не превышает погрешности эксперимента и вызвано, на наш взгляд, методической погреш-

ностью, вносимой включением омического делителя напряжения, сопротивление которого соизмеримо с разрядным сопротивлением ГИН. В наших расчетах включение омического делителя не учтено. При решении задачи анализа шаг интегрирования системы (2) принят равным $5 \cdot 10^{-13}$ с, а начальный шаг дискретизации $H_0 = 6,5536 \cdot 10^{-8}$ с; время решения на ЦВМ М-222 составляет 12 с.

Из изложенного следует, что принятая схема замещения ГИН удовлетворительно описывает процесс формирования импульса напряжения на комплексной RLC-нагрузке, а используемый системный метод обеспечивает интегрирование жестких математических моделей этого процесса.

Остановимся на математической постановке задачи синтеза параметров схемы ГИН (рис. 1). Введем вектор неизвестных параметров:

$$X = (C_1, L_3, L_6, R_2, R_3, R_4, R_6, U_1). \quad (4)$$

Неизвестные параметры в реальных ГИН связаны определенными зависимостями, а их значения подчиняются ограничениям, накладываемым из условий реализуемости. Для нашего случая имеем следующие ограничения в виде равенств $L_3 = a_1 R_3$ и в виде неравенств $C_1 > 0$, $L_6 > 0$, $R_2 > 0$, $R_3 > 0$, $R_4 > 0$, $R_6 > 0$, $U_1 > 0$, где a_1 — собственная постоянная времени демпфирующего сопротивления. Параметры схемы замещения C_5 , C_7 , C_8 , L_1 , L_8 , R_1 , R_8 считаем постоянными. Их значения задаем из условий технической реализуемости элементов ГИН, определяем в результате решения задачи идентификации или же путем теоретических расчетов.

Выберем в качестве первого по важности критерия оптимальности суммарный критерий совпадения заданного и расчетного импульсов напряжения четвертой степени в виде

$$q_1(X) = U_m^{-4} \sum_{i=1}^K f_i^4. \quad (5)$$

где $f_i = |U_9(t_i) - U_7(t_i)| - 0,025 U_m$, если $f_i > 0$; $f_i = 0$, если $f_i \leq 0$; $U_9(t_i)$, $U_7(t_i)$ — значения в i -й точке дискретизации заданного и расчетного напряжения на нагрузке.

Вторым по важности критерием примем значение запасаемой энергии ГИН:

$$q_2(X) = 0,5 C_1 U_1^2. \quad (6)$$

Таким образом, задачу синтеза параметров схемы генератора импульсов напряжения (рис. 1) можем сформулировать как задачу нелинейного программирования, состоящую в определении значений параметров (4), которые минимизируют критерии (5) и (6) при выполнении принятых ограничений.

Для решения полученной задачи синтеза выбран метод скользящего допуска [11], который позволяет учитывать ограничения на параметры оптимизации как в виде равенств, так и в виде неравенств и не требует вычисления значений производных критериев оптимальности.

Применение суммарного критерия вида (5) вызвано тем, что вследствие отличия длительности фронта и длительности заданного импульса напряжения более чем на два порядка, а также вследствие учета в математической модели паразитных параметров ГИН и нагрузки, постоянные времени которых значительно меньше длительности фронта, интегральные по времени критерии и критерии с постоянным шагом дискретизации

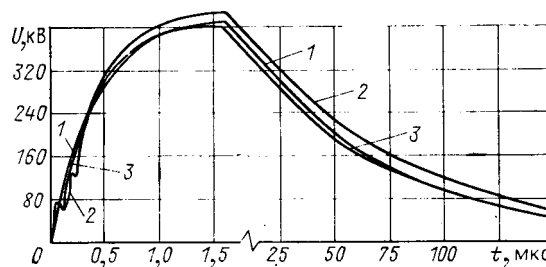


Рис. 3. Фронт экспериментального и расчетных импульсов напряжения на емкостном делителе: 1 — фронт экспериментального импульса [10]; 2 — фронт расчетного импульса [10]; 3 — фронт расчетного импульса напряжения на емкости C_7 в схеме рис. 1

слабо чувствительны к отличиям импульсов на фронте. В нашем случае чувствительность критерия (5) на фронте импульса повышаем за счет увеличения шага дискретизации на спаде. Такая формулировка суммарного критерия стала возможной в результате использования системного метода решения СДУ, который не накладывает практически никаких ограничений на величину шага дискретизации. Численные эксперименты показали, что количество точек дискретизации на фронте импульса должно составлять 10—20 % точек дискретизации во всем интервале интегрирования. Четвертая степень (5) обусловлена тем, что синтез параметров (4) по суммарным критериям 1-, 2-, 3-, 5- и 6-й степеней при прочих равных условиях требует больших затрат машинного времени.

Обычно метод скользящего допуска применяется для решения однокритериальных задач нелинейного программирования. В нашем случае задача синтеза сформулирована как двухкритериальная и решается сведением к однокритериальной применением обобщенного нормированного критерия оптимальности в виде

$$Q(X) = s q_1(X)/q_1(X^0) + q_2(X)/q_2(X^0), \quad (7)$$

где $q_1(X^0)$, $q_2(X^0)$ — соответственные значения критериев оптимальности в исходной точке оптимизации; s — постоянный весовой коэффициент.

Авторами проведен ряд численных экспериментов по выбору значений критериев, стоящих в знаменателях слагаемых, и значения весового коэффициента. Установлено, что результаты синтеза подвержены зависимости от значений $q_1(X^0)$ и $q_2(X^0)$. Для исключения этой зависимости необходимо, чтобы значения критериев в исходной точке оптимизации и значения в текущих точках оптимизационного поиска представляли убывающие последовательности. Такую исходную точку назовем непротиворечивой по критериям $q_1(X^0)$ и $q_2(X^0)$. Естественно, что количество непротиворечивых исходных точек неограниченно большое, однако выбор конкретной точки не представляет труда. Критерий $q_1(X)$ в любом случае будет убывающим (кроме маловероятного случая, когда заданный и расчетный импульсы совпадают и $q_1(X^0) = 0$), а для убывания $q_2(X)$, например для емкостной нагрузки, достаточно принять $U_1 = 2 U_m$, $C_1 = 2 C_8$. Что касается выбора весового коэффициента, то наиболее удачными, на наш взгляд, являются значения $s = 2 \div 5$.

Пример. Рассмотрим синтез параметров схемы замещения ГИН 8-го порядка для получения на нагрузке импульса напряжения, описываемого уравнением (1), и сравним полученные значения с результатами, приведенными в [10].

В качестве исходных параметров ГИН, а также заданных параметров нагрузки взяты значения, реализующие ГИН, параметры которого приведены в [10], и в данной статье. Максимальное значение заданного напряжения и постоянной времени демпфирующего сопротивления определены следующими: $U_m = 415$ кВ; $a_1 = 0,16$ мкс.

При принятых ранее значениях шага интегрирования и дискретизации стандартный грозовой импульс описывается 60 значениями напряжения в точках дискретизации, причем его фронт представляется 15 точками.

Результаты расчета при $s = 2$ в формуле (7) приведены в таблице, а графики заданного и расчетных импульсов напряжения представлены на рис. 3. Из приведенных результатов следует, что предлагаемая методика позволяет синтезировать оптимальные параметры схемы ГИН, обеспечивающие воспроизведение заданного импульса напряжения на нагрузке с заданной точностью.

В рассматриваемом примере применение предлагаемой методики синтеза обеспечивает формирование на оговоренной на-

Результаты синтеза параметров схемы ГИН

Характеристики синтеза	Значения в исходной точке [10]	Значения, полученные по предлагаемой методике
C_1 , нФ	25,0	6,88
L_3 , мкГн	5,0	5,81
L_6 , мкГн	2,0	0,82
R_2 , Ом	3750	16 506
R_3 , Ом	62,5	36,4
R_4 , Ом	15 000	22 497
R_6 , Ом	230,0	231,5
U_1 , кВ	470,0	496,8
Значения критериев $q_1(X)$	$3,23 \cdot 10^{-4}$	$1,05 \cdot 10^{-4}$
$q_2(X)$, Дж	2761,25	849,37
Количество вычислений ограничений	—	1 568
Количество вычислений критериев	—	1 489
Время синтеза на ЦВМ М-222, с	—	17 211

грузке стандартного грозового импульса напряжения (1) с точностью 2,5 % при снижении запасаемой энергии ГИН, по сравнению со значением, приведенным в [10], на 70 %.

При проведении испытаний электротехнического оборудования с целью определения фактической электрической прочности изоляции максимальное значение напряжения в испытательном импульсе выбирают в 2—5 раз выше, чем нормируемое напряжение в зависимости от класса изоляции. Однако при заданном даже «произвольно» максимальном значении напряжения возникает вопрос о соответствии испытательного импульса заданному ГОСТ и о минимизации при этом энергоемкости ГИН, причем с увеличением уровня напряжений последний стоит более остро. Таким образом, применение предлагаемой методики наиболее целесообразно и эффективно при проектировании и эксплуатации высокоэнергетических мегавольтных ГИН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев А. А. Высоковольтное испытательное оборудование и измерения. — М.: Энергия, 1960.
2. Смирнов С. М., Терентьев П. В. Генераторы импульсов высокого напряжения. — М.—Л.: Энергия, 1964.
3. Федченко И. К., Соколовский С. А., Ильенко О. С. Расчет напряжения при испытаниях электрооборудования грозовыми импульсами. — Киев: Выща школа, 1979.
4. Генераторы импульсов высокого напряжения/В. В. Кононотоп, Г. Ф. Нескородов, И. Р. Пекарь, С. М. Фертик. — В кн.: Тезисы докладов расширенного заседания секции IV научного

совета АН СССР на тему: «Емкостные накопители энергии в электрофизических установках предельных параметров». — Харьков: Изд. Харьковского политехнического ин-та, 1981.

5. Губарев Г. Г. Синтез параметров схемы генератора импульсов напряжения. — В кн.: Тезисы докладов расширенного заседания секции IV научного совета АН СССР на тему: «Емкостные накопители энергии в электрофизических установках предельных параметров». — Харьков: Изд. Харьковского политехнич. ин-та, 1981.

6. Лоханин А. К., Иванова Н. С. Соотношения между расчетными параметрами импульсной волны. — Электричество, 1968, № 12.

7. Ракитский Ю. В., Устинов С. М., Черноуцкий И. Г. Численные методы решения жестких систем. — М.: Наука, 1979.

8. Демирчян К. С., Волков В. М., Карташев Е. Н. Сравнительный анализ методов численного интегрирования при расчете переходных процессов в электрических цепях. — Электричество, 1976, № 9.

9. Веников В. А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики). — М.: Высшая школа, 1979.

10. Heilbronner F. Das Durchzünder mehrstufiger Stossgeneratoren. — ETZ — A, 1971, Bd 92, H. 6.

11. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. — М.: Мир, 1975.

[17.12.82]

УДК 537.52.001.6

Характеристики разряда в воздушном промежутке с электродом, покрытым твердым диэлектриком

СОКОЛОВА М. В.

Московский энергетический институт

В статье представлены результаты экспериментального исследования разряда в воздушном промежутке с твердым диэлектриком на электроде и анализ особенностей такого разряда при повышенных частотах напряжения. Более ранние исследования, некоторые результаты которых изложены в [1], позволили установить, что при прочих равных условиях увеличение частоты воздействующего напряжения ведет к изменению тока разряда, причем при частоте выше 500—1000 Гц происходит снижение среднего значения амплитуд импульсов тока. В коаксиальной системе электродов с диэлектриком на одном из них, представляющей собой модель озонатора, уменьшение тока с ростом частоты сопровождается уменьшением количества образующегося озона, что снижает производительность озонатора. Последнее обстоятельство в значительной степени явилось основанием для дальнейшего изучения отмеченного явления.

Из всего многообразия разрядных характеристик для дальнейшего анализа были взяты амплитуда и длительность импульсов тока разряда и характер распределения зарядов, остающихся на поверхности диэлектрика после разряда. Исследование проводилось при частоте 50—2500 Гц в промежутке с однородным или квазиоднородным электрическим полем, когда на одном из электродов находится слой твердого диэлектрика (стекло, стеклоэмали, оргстекло), толщина которого соизмерима с шириной газовой части промежутка. Значения pd воздушного промежутка (p — давление газа; d — ширина газовой зазора) таковы (5—30 кПа·см), что разряд имел дискретную форму [2]. В каждый полупериод воздействующего напряжения в воздухе проходит последовательность индивидуальных разрядов, дискретных в пространстве и во времени. В результате экспериментов было выявлено влияние на изучавшиеся характеристики разряда частоты воздействующего напряжения, степени перенапряжения и длительности его воздействия.

Имеющиеся к настоящему времени сведения о характере разрядных процессов в газовом промежутке с твердым диэлектриком на электроде при указанных выше значениях pd позволяют представить следующую упрощенную картину разряда

при воздействии переменного напряжения. Каждый индивидуальный разряд в какой-то области промежутка развивается по многолапивно-стримерному механизму [3]. При соприкосновении головки стримера с поверхностью диэлектрика начинается развитие поверхностного разряда. При большом поверхностном сопротивлении диэлектрика на его поверхности оседает заряд, созданный как в процессе дрейфа зарядов из разрядной зоны газового промежутка, так и в результате поверхностного разряда. Этот заряд со знаком, противоположным знаку полярности электрода, ослабляет поле в промежутке, и разряд в газе прекращается. Осциллограмма тока такого разряда имеет форму импульса с крутым фронтом и длительностью 0,2—1,5 мкс в зависимости от параметров разрядной цепи.

После разряда в газе заряд на поверхности диэлектрика, имеющий в зависимости от полярности форму круглого пятна (отрицательный заряд) или звездочки (положительный заряд), сохраняется до следующего полупериода, усиливает поле в прилегающей части газового промежутка и определяет развитие здесь следующего разряда обратной полярности. По осциллограммам и с помощью электрографии обнаружено строго дискретное развитие разрядов по газовому промежутку, причем электрограммы показали значительные размеры пятен заряда на диэлектрике, существенно превосходящие диаметр канала разряда в газе [3]. Наблюдается связь амплитуды импульса тока и размеров пятна заряда: более мощным импульсам соответствуют и большие размеры пятен на диэлектрике, причем с увеличением длины разрядного промежутка и перенапряжения импульсы тока разряда становятся более мощными.

Как уже указывалось в [1], с ростом частоты воздействующего напряжения средние значения амплитуд импульсов тока разряда изменяются, причем особенно сильно в полупериод напряжения, когда диэлектрик является анодом («положительные» импульсы). Для диэлектриков с высоким значением диэлектрической проницаемости $\epsilon = 10—15$ с ростом частоты от 50 до 500 Гц наблюдается рост и средних амплитуд, особенно сильный при наибольших значениях ϵ . После 500 Гц амплитуды резко снижаются (в 5—6 раз). Для диэлектриков с диэлектриче-

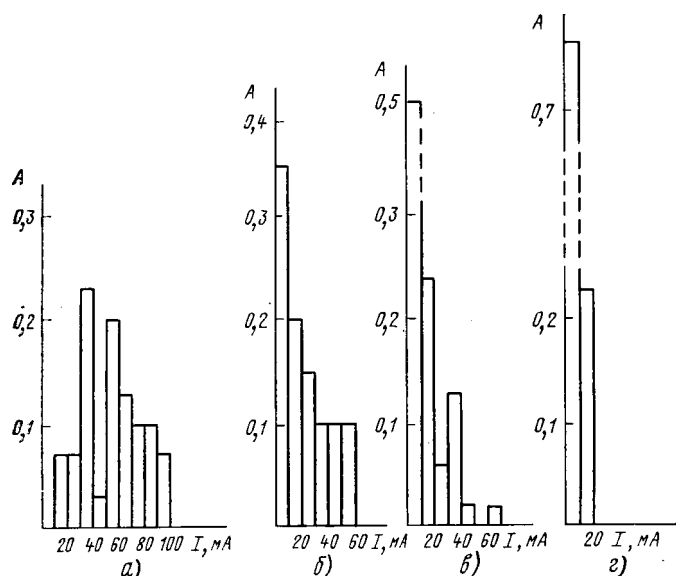


Рис. 1. Гистограммы средних амплитуд положительных импульсов тока разряда при разной частоте напряжения (диэлектрик — оргстекло, коаксиальная система электродов): а — $f = 50$ Гц; б — $f = 500$ Гц; в — $f = 1000$ Гц; г — $f = 1500$ Гц

ской проницаемостью $\epsilon = 4-7$ снижение амплитуд происходит монотонно с ростом частоты от 50 Гц и выше.

В полупериод, когда диэлектрик является катодом («отрицательные» импульсы), не происходит столь резких изменений амплитуд, но характер изменения аналогичен случаю положительных импульсов.

Для всех диэлектриков при частотах выше 1500—2000 Гц амплитуды положительных импульсов в 2—8 раз ниже, чем при частоте 50—500 Гц, отрицательных — в 1,2—2 раза. При этом критической частотой, при которой во всех случаях наблюдается переход к снижению амплитуды импульсов тока разряда, является частота 500—1000 Гц. Следует отметить, что хотя с ростом частоты значения ϵ диэлектриков снижаются (особенно заметно для диэлектриков с высоким значением ϵ), это снижение не превосходит 25 % при изменении частоты от 50 до 3000 Гц, что не может обусловить столь сильное изменение тока разряда.

Дальнейший анализ показал, что с ростом частоты уменьшаются не только средние значения амплитуд импульсов тока разряда. Их изменение является отражением уменьшения ширины распределения вероятностей амплитуд импульсов (рис. 1). Из приведенных гистограмм, построенных по результатам обработки не менее чем 100 импульсов, измеренных в разные полупериоды, видно, что происходит сдвиг вероятностей амплитуд в область малых значений, причем характер распределения резко меняется при указанной выше критической частоте.

Излагаемые ниже экспериментальные результаты получены при работе либо с плоской системой электродов диаметром 60—80 мм с шириной газового зазора 0,5—2,5 мм и толщиной диэлектрической пластинки 1—1,5 мм, либо в коаксиальной системе трубчатых электродов при тех же значениях ширины газового зазора и толщине диэлектрика. В последнем случае осевая длина разрядной зоны составляла 20 мм при диаметре внешнего металлического электрода 40—42 мм. Для такого соотношения размеров промежутка электрическое поле в разрядной зоне практически однородно.

В плоской системе электродов использовались только оргстекло и неосушенный воздух, в системе трубчатых электродов — стекло разных марок, оргстекло, стекломали. Разряд исследовался в потоке осушенного воздуха (влажность не более $0,5 \text{ г/м}^3$), причем скорость потока газа обеспечивала пребывание воздуха в пределах разрядной зоны в течение 1—5 с. При указанной влажности поверхностное сопротивление всех диэлектриков составляет $10^{14} - 10^{17}$ Ом. Импульсы тока разряда регистрировались как сигналы с сопротивления 25 Ом, включенного последовательно с разрядным промежутком.

Основной метод, который был использован для исследования зарядов, остающихся на поверхности диэлектрика, это метод электрографии [4], позволяющий получить картину распределения зарядов, остающихся на диэлектрике за весь пе-

риод существования разряда в промежутке, начиная от момента его зажигания при включении высокого напряжения.

Типичная картина заряда на плоском диэлектрике после воздействия разряда при частоте 50 Гц и перенапряжении около 5 % представлена на рис. 2. Часть А фотографии соответствует распределению проявленного положительного заряда, часть В — распределению проявленных положительного и отрицательного зарядов. Представленные на фотографии электрограммы обладают рядом особенностей. В целом картина распределения зарядов соответствует тому, что уже получалось ранее [5] на фотопленке, помещавшейся на поверхности диэлектрика и засвечиваемой разрядом. Видны дискретные следы поверхностных разрядов. Размеры пятен остающегося на диэлектрике заряда составляют в среднем 3—6 мм при ширине газового зазора и толщине диэлектрической пластинки 1,5 мм. Это существенно меньше, чем при одиночных разрядах в промежутке шар — плоскость при тех же размерах промежутка и перенапряжении, что является результатом своеобразного «экранирования» параллельными разрядами друг друга: тангенциальная составляющая поля уже осевших зарядов препятствует развитию близлежащего поверхностного разряда, и размеры остающихся пятен заряда уменьшаются.

Между четкими пятнами заряда видны беспорядочные следы зарядов, оставшихся на поверхности от большого числа предыдущих разрядов. Кроме того, наблюдаются пустые места, на которых заряд не проявляется. Эти пустые места соответствуют обратным разрядам с поверхности диэлектрика на противоположный электрод под действием поля самого осевшего заряда после отключения высокого напряжения или при его снижении. Специальные расчеты такого поля, учитывающие и заряды, индуцируемые на электродах, показывают возможность обратных разрядов.

Преобладание пятен заряда определенного знака определяется тем, в какой полупериод произошло отключение высокого напряжения.

С увеличением ширины газового промежутка амплитуды импульсов тока возрастают, и увеличиваются размеры пятен заряда на поверхности диэлектрика. При росте частоты воздействующего напряжения характер распределения зарядов по диэлектрику в значительной степени определяется временем существования разряда в промежутке. После кратковременного (менее 0,1 с) воздействия на промежуток напряжения любой частоты, лишь незначительно превышающего по значению начальное напряжение разряда в газе (т. е. при минимальном перенапряжении), на поверхности остаются заряды, рисунок распределения которых с изменением частоты не изменяется. Однако диаметр пятен заряда с ростом частоты уменьшается соответственно уменьшению амплитуд импульсов тока разряда, регистрируемых осциллографом. При частоте 2500 Гц средние размеры пятен примерно в 2 раза меньше, чем при 50 Гц. Последнее обстоятельство — уменьшение диаметра пятен заряда с частотой соответственно уменьшению амплитуд импульсов тока — имеет место лишь после прохождения более 40—50 периодов напряжения, считая от момента включения. Для первых 1—10 периодов амплитуды импульсов тока и размеры пятен заряда почти одинаковы для 50 и 2500 Гц. Но со временем они уменьшаются, при этом для больших частот в большей степени.

С увеличением перенапряжения даже при его относительно кратковременном воздействии (0,5—1 с) при частотах выше 500 Гц на электрограммах в средней части, где отсутствует влияние краевого эффекта, начинают проступать области с размытым рисунком (рис. 3), которые при частоте выше 2000 Гц превра-

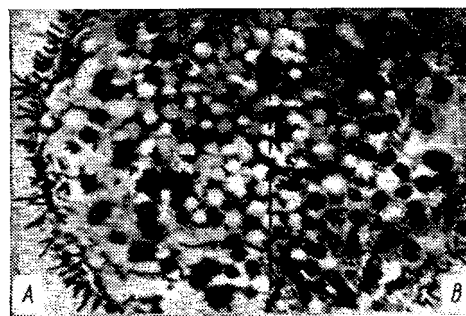


Рис. 2. Электрограмма заряда на диэлектрике после разряда при частоте 50 Гц и перенапряжении $1,2 U_0$ (время действия разряда 3 с)

щаются в области, где заряд любого знака либо вообще не проявляется (что-то типа беззарядной области), либо проявляется в виде крупных пятен ровного диффузного потемнения, соответствующего большей частью размытому отрицательному заряду малой плотности. При этом, чем выше частота, тем при меньших перенапряжениях возникают непроявляемые области.

При 50 Гц при всех перенапряжениях вплоть до $1,5 U_0$, где U_0 — начальное напряжение разряда, это явление при сравнительно кратковременном воздействии не возникает. При частоте более 2000 Гц и при перенапряжении более $1,2 U_0$ во всей средней части картины распределения заряд не проявляется, а проявляется лишь узкая полоса рисунка по внешней окружности картины там, где действует краевой эффект. Аналогичная картина распределения заряда наблюдается и в цилиндрической системе электродов.

При длительном действии разряда, соответствующем прохождению 3—5 тыс. периодов, непроявляемые области появляются даже при небольшом перенапряжении (около $1,1 U_0$), если частота превышает 500—1000 Гц. Более того, даже при 50 Гц и перенапряжении порядка $1,5 U_0$ на поверхности диэлектрика уже проступают пятна заряда с размытым рисунком, что соответствует началу появления непроявляемых областей. Таким образом, они представляют собой результат установившихся процессов, имеющих место после разряда при прохождении 3—5 тыс. периодов.

Экспериментально установлено, что непроявляемые области появляются как во влажном (более 70 % влажности), так и в сухом воздухе, в котором содержание влаги не превышает $0,5 \text{ г/м}^3$, если поверхностное сопротивление диэлектрика при этом остается выше 10^{14} Ом . Следует отметить, что на характер распределения остающихся зарядов не влияет способ отключения высокого напряжения.

Специальные измерения показали, что чувствительность электрографического метода в наших условиях такова, что проявляется заряд с плотностью, большей $3,4 \cdot 10^{-9} \text{ Кл/см}^2$. Это значит, что на «пустых» местах плотность заряда на поверхности диэлектрика должна быть меньше указанного значения.

Приближенная оценка минимальной плотности зарядов в пределах четкого пятна заряда при единичных разрядах [3] дает значение не менее $4\text{—}5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл/см}^2$. Следовательно, если головка стримера разряда, развивающегося в газе, доходит до поверхности диэлектрика, то в результате поверхностного разряда там остается заряд, который обязательно проявляется использованным методом электрографии.

Таким образом, эксперименты выявили аномальное, не отмечавшееся ранее распределение заряда по поверхности твердого диэлектрика после длительного существования разряда в прилегающем газовом промежутке. С этим явлением тесно связано другое — снижение средней амплитуды импульсов тока разряда. Если учесть, что заряды на поверхности диэлектрика остаются после разряда в газе, то естественно предположить, что появление непроявляемых областей должно отражать какое-то изменение характера процесса в газе или его интенсивности.

При увеличении частоты воздействующего напряжения выше критического значения не только уменьшаются амплитуды импульсов тока, но уменьшается и длительность импульсов по осциллограммам: например, для диэлектрика с проницаемостью $\epsilon=9$ с ростом частоты от 50 до 2500 Гц длительность импульса снизилась от 0,8 до 0,3 мкс.

Ранее [6] было установлено, что снижение среднего значения амплитуд импульсов тока разряда происходит и в том случае, если на поверхность диэлектрика с поверхностным сопротивлением $\rho_s=10^{14} \text{ Ом}$ наносятся пятна полупроводящей краски с $\rho_s=10^6 \text{ Ом}$. Диаметр пятен 1—3 мм с интервалом между ними 7—10 мм. В итоге среднее значение поверхностного сопротивления падает. Аналогичное снижение амплитуд импульсов тока происходит при прочих равных условиях и при увеличении влажности газа [7], если при этом на несколько порядков падает поверхностное сопротивление диэлектрика (с 10^{15} до 10^{12} Ом).

На основании приведенных фактов можно предположить, что обнаруженное изменение характера распределения заряда по поверхности твердого диэлектрика должно быть связано с изменением его поверхностных свойств. С ростом частоты и после определенного времени воздействия разряда (скорее всего теплового воздействия) поверхность диэлектрика становится более проводящей, причем этот процесс имеет место для всех рассмотренных видов диэлектриков: оргстекла, разных стекол, стеклотекстолита.

Кроме того, сам аномальный характер распределения зарядов по диэлектрику при повышенной частоте позволяет предположить также, что малый, непроявляющийся заряд на диэлектрике образуется только за счет дрейфа зарядов из газового проме-

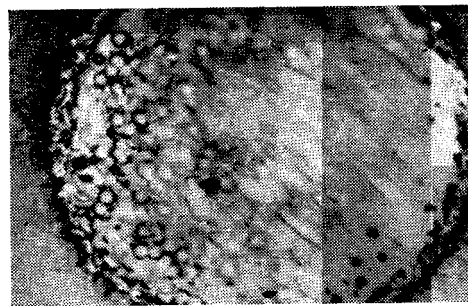


Рис. 3. Электрограмма заряда на диэлектрике после разряда при частоте 2000 Гц и перенапряжении $1,2 U_0$ (время действия разряда 3 с)

жутка (отсюда размытый рисунок в процессе образования непроявляемых областей), а не за счет также и поверхностных разрядов. Это может происходить, если в промежутке развиваются незавершенные разряды, так что головки стримеров не доходят до поверхности диэлектрика. Особенно это должно сказаться, когда разряд развивается к диэлектрику, т. е. для положительных импульсов (диэлектрик — анод), что и наблюдается в экспериментах.

Незавершенные разряды, будучи менее интенсивными, дают меньшую амплитуду импульса тока, меньшую его длительность и, не распространяя канал до поверхности диэлектрика, не могут вызвать там поверхностных разрядов. На возможность возникновения незавершенных разрядов указано и в [8], но там считаются незавершенными все разряды, развивающиеся к диэлектрику, так как принято, что дрейфующий к диэлектрику заряд во всех случаях препятствует развитию канала разряда через весь промежуток. Эксперименты показали, что незавершенными разрядами становятся лишь при определенных условиях. Если этих условий нет, то наличие твердого диэлектрика не препятствует развитию канала разряда через весь промежуток, поскольку имеющиеся на поверхности диэлектрика заряды могут не только ослаблять поле, но и усиливать его, о чем говорит сложная картина распределения, представленная на рис. 2.

Выводы. 1. Разряд в промежутке с твердым диэлектриком на электроде имеет ряд особенностей, не отмеченных ранее. При неизменных значениях в одном и том же промежутке может происходить изменение амплитуд импульсов тока и их длительности, причем с этим явлением согласуется изменение характера распределения зарядов, остающихся на диэлектрике. Факторами, влияющими на подобный процесс, являются время существования разряда в промежутке, т. е. предистория процесса, частота воздействующего напряжения и перенапряжение.

2. Если поверхностное сопротивление диэлектрика превышает 10^{14} Ом , то при частотах выше 500—1000 Гц и перенапряжении больше $1,1 U_0$, на поверхности диэлектрика возможно появление значительных областей заряда малой плотности с размытым рисунком. При этом происходит уменьшение тока разряда. Подобное аномальное распределение заряда устанавливается не сразу. В первые 10 периодов разряд в промежутке и заряд на диэлектрике одинаковы при всех частотах от 50 до 2500 Гц. Требуется, по крайней мере, 3—5 тыс. периодов для появления размытых областей, в которых плотность заряда в условиях проведенных экспериментов становится меньше $3 \cdot 10^{-9} \text{ Кл/см}^2$.

3. Информация о распределении заряда по поверхности диэлектрика, получаемая с помощью электрографии, является более полной, чем, например, с помощью засвечиваемой фотопленки, помещаемой на поверхность диэлектрика. В частности, использование электрографии позволяет установить, что при переменном напряжении в каждый полупериод разряд в газовом промежутке развивается в условиях, когда на диэлектрике находится заряд с очень сложным характером распределения положительных, отрицательных и пустых (от обратных разрядов) мест, причем заряды от разрядов в предшествующие полупериоды сохраняются длительно для диэлектриков с поверхностным сопротивлением более 10^{14} Ом .

4. Полученные результаты необходимо иметь в виду при теоретическом рассмотрении условий зажигания и горения разряда в промежутке с диэлектриком при повышенных частотах напряжения, в особенности при анализе распределения поля в промежутке и электрохимических процессов, идущих в разряде

Влияние длительности воздействия напряжения и перенапряжения на разряд необходимо учитывать при использовании результатов, получаемых в лабораторных условиях на моделях озонаторов, для анализа работы длительно работающих промышленных установок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sokolova M. V. The frequency influence on the discharge characteristics of an ozonizer.—3rd Int. Symp. on HV Eng., Milan, 1979, № 53.
2. Джуварлы Ч. М., Вечхайзер Г. В., Леонов П. В. Некоторые особенности разрядов в газовой полости, ограниченной диэлектриком. — Rev. Roum. Sci. Techn. — Electrotechn. et Energetique, Bucuresti, 1970, vol. 15, № 2.
3. Сергеев Ю. Г., Соколова М. В. Распределение заряда по поверхности при разряде в газовом промежутке с диэлектриком на электроде. — Электричество, 1980, № 2.

4. Иванов А. В., Ларионов В. П. Распределение заряда в зоне ионизации при поверхностном разряде. — Электричество, 1970, № 3.

5. Gobrecht H., Meinhardt O., Hein F. Über die stille elektrische Entladung in Ozonisatoren. — Zeitschrift für Elektrochemie, 1964, Bd 68, № 1.

6. Sokolova M. V. Some peculiarities of a gas discharge in a gap with dielectric. — XIIIth Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases, Berlin, 1977.

7. Соколова М. В., Артамонов В. Г. Влияние рода газа на образование озона и на характер разряда в промежутке с диэлектриком. — Труды МЭИ, 1978, вып. 358, с. 33—36.

8. Джуварлы Ч. М., Вечхайзер Г. В., Леонов П. В. Исследование разряда между диэлектрическими поверхностями с помощью электронно-оптического преобразователя. — ЖТФ, 1970, т. 40, № 7, с. 1515—1519.

[02.02.82]

УДК 621.311.016.001.24

Расчеты установившихся режимов энергосистем с помощью тренажера

ЛИСЕЕВ М. С., ШУЛЬЖЕНКО С. В.

Московский энергетический институт

Расчеты установившихся режимов составляют существенную часть общего объема исследований электроэнергетических систем (ЭЭС), выполняемых как на стадии проектирования этих систем, так и в процессе их эксплуатации. Эти расчеты необходимы при выборе конфигурации схемы ЭЭС и параметров ее элементов, при анализе статической, динамической и результирующей устойчивости, при оценке токов короткого замыкания и при определении наиболее экономичных режимов работы ЭЭС [1]. Кроме того, расчеты установившихся режимов имеют и большое самостоятельное значение. Анализируя результаты этих расчетов, можно получить ответы на следующие практически важные вопросы: осуществим ли данный режим; не превышают ли токи и мощности в элементах ЭЭС допустимых или предельных значений; каковы потери активной мощности в сети; не выходит ли напряжение в узловых точках системы за заданные пределы; как повлияет отключение или включение новых элементов ЭЭС (ВЛ, трансформаторов, генераторов, нагрузок и т. д.) на потокораспределение в расчетной схеме электрической сети, уровни напряжения и потери.

В настоящее время для расчетов установившихся режимов ЭЭС используется большое количество алгоритмов и программ [2, 3], среди которых наиболее широкое применение нашли программы, базирующиеся на методе Ньютона — Рафсона. Эти программы обладают широкими возможностями и позволяют варьировать в достаточном диапазоне исходные данные, рассчитывать схемы ЭЭС до 3000 узлов (программа СЕТЬ — 3000, разработанная в ЦДУ ЕЭС СССР).

Чем сложнее программа, тем, как правило, труднее пользование ею. Так, необходимо запомнить большое число директив для выбора тех или иных функций программы. Во время работы таких программ требуется ввести по определенным правилам большое количество исходной информации. Результаты расчета несмотря на их представление в достаточно наглядной табличной форме требуют дополнительного осмысления и привязки к схеме анализируемой сети. Имеется и ряд других сложностей пользования указанными программами.

В связи с этим возникает необходимость в разработке достаточно простой программы-тренажера, которая позволила бы неквалифицированному пользователю быстро освоить основные правила и приемы расчета на ЭВМ установившихся режимов ЭЭС. Такая программа полезна в первую очередь специалистам режимных и диспетчерских служб энергосистем, внедряющих автоматизированные системы диспетчерского управления. Программа-тренажер необходима и для специалистов проектных организаций, внедряющих системы автоматизированного проектирования. Наконец, такая программа необходима и при подготовке инженеров-электриков по специальностям «Электроснабжение промышленных предприятий, городов и сельского хозяйства», «Электрические сети и системы», «Кибернетика электрических систем» в вузах страны.

На кафедре электрических систем МЭИ разработана программа РЕЖИМ для расчета на ЭВМ установившихся режимов ЭЭС. Основное отличие программы РЕЖИМ от широко

используемых в энергосистемах и проектных организациях промышленных программ состоит в том, что она ориентирована на диалог пользователя и ЭВМ. Пользователь через дисплей задает условия расчета (мощности и модули напряжения генераторов, величины нагрузок, конфигурацию сети, изменения в ее схеме и т. д.), ЭВМ выводит на дисплей результаты расчета в виде полного набора параметров установившегося режима ЭЭС. При необходимости можно также получить документальные копии используемых исходных данных и результатов расчета. Если получившийся режим по каким-либо причинам пользователя не удовлетворяет, он может оперативно изменить исходные данные и получить новый результат.

Общение пользователя и ЭВМ идет на простом командном языке (студенты 4 и 5 курсов МЭИ осваивают этот язык за 30—40 мин работы за дисплеем). Программа РЕЖИМ автоматически проверяет правильность исходных данных и команд пользователя, корректируя их, а в случае невозможности коррекции обращает внимание пользователя на необходимость повторного обращения к программе.

Состав исходных данных. Степень идеализации схем замещения элементов электрической сети определяется в первую очередь целями и назначением расчетов. Так, при выполнении расчетов проектного характера, когда нагрузки задаются некоторыми прогнозируемыми значениями, нет необходимости в точном представлении элементов энергосистемы. Если в результате расчета требуется установить лишь соответствие токов и потоков мощности в ветвях и модулей напряжения в узлах электрической сети допустимым значениям, возможно более грубое, упрощенное представление элементов энергосистемы, чем в случае, когда в цели расчета входит и определение потерь активной мощности (например, при решении задачи оптимального распределения активных нагрузок между электростанциями).

Поэтому ветви сети ЭЭС представляются четырехполюсниками. Для линии электропередачи используется П-образная схема замещения, а для трансформатора — Г-образная схема замещения, но без шунта намагничивания. При этом потери холостого хода трансформатора включаются в нагрузку того узла, к которому присоединена обмотка высшего напряжения.

Все узлы схемы замещения делятся на балансирующий, обычно самая мощная, ведущая режим электростанция или другая ЭЭС;

генераторные, где требуется поддерживать заданный модуль напряжения и имеется, по крайней мере, генерация реактивной мощности;

нагрузочные.

Балансирующий узел всегда используется и в качестве базисного узла, поэтому в нем следует задавать только модуль напряжения U_0 . Мощность же вычисляется в процессе расчета установившегося режима.

Для генераторного узла исходными данными будут: модуль напряжения U_r , активная генерация P_r и нагрузка P_n и реактивная нагрузка Q_n . В качестве технического ограничения выступает максимально допустимый предел изменения реактив-

ной мощности $Q_{\max} = Q_{\Gamma \max} - Q_N$ (здесь $Q_{\Gamma \max}$ — максимально допустимая генерация реактивной мощности).

Следовательно, в таких узлах в процессе расчета определяется генерация реактивной мощности Q_{Γ} при условии выдерживания модулей напряжения в этих же узлах и аргументы напряжения.

В нагрузочных узлах задаются активные P_N и реактивные Q_N нагрузки, а определяются модули и аргументы напряжения.

Расчетные методы. Программой РЕЖИМ решается следующая система нелинейных алгебраических уравнений и неравенств:

$$\left. \begin{aligned} P_{\Gamma b i} &= 0, \quad i = 1, \dots, N-1; \\ Q_{\Gamma b i} &= 0, \quad i = 1, \dots, N-1; \\ Q_{\Gamma k} &\leq Q_{\Gamma k \max} = Q_{k \max} + Q_{Nk}, \quad k = 1, \dots, N_{\Gamma}; \\ U_j &\geq \gamma U_{j \text{ ном}}, \quad j = 1, \dots, N-1, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $P_{\Gamma b i}$ и $Q_{\Gamma b i}$ — небалансы активной и реактивной мощности узла i ; $Q_{\Gamma k}$ — генерация реактивной мощности в узле k ; $U_{j \text{ ном}}$ — номинальное напряжение узла j ; N — число узлов в схеме замещения; N_{Γ} — число генераторных узлов в схеме замещения; γ — коэффициент, задающий минимальный уровень, до которого может снижаться напряжение в узлах электрической сети в процессе итерационного расчета (в программе РЕЖИМ $\gamma = 0,7$).

Неизвестными в системе (1) будут аргументы напряжений всех узлов, кроме балансирующего, аргумент которого принимается равным нулю, модули напряжений нагрузочных узлов и генерации реактивной мощности всех генераторных узлов. Так как модуль и аргумент напряжения балансирующего узла не меняются в процессе решения системы (1), число неизвестных в этой системе уравнений и неравенств равно $2N-2$.

Уравнения системы (1) можно выразить в виде:

$$\left. \begin{aligned} P_{\Gamma} &= - \sum_{j=1}^{M_6} P_{\Gamma j}; \quad Q_{\Gamma} = - \sum_{j=1}^{M_6} Q_{\Gamma j}; \\ P_{\Gamma b k} &= - \sum_{j=1}^{M_k} P_{\Gamma kj} - P_{\Gamma k} - P_{Nk}; \quad Q_{\Gamma k} = - \sum_{j=1}^{M_k} Q_{\Gamma kj} - Q_{Nk}; \\ P_{\Gamma b i} &= - \sum_{j=1}^{M_i} P_{\Gamma ij} - P_{Ni}; \quad Q_{\Gamma b i} = - \sum_{j=1}^{M_i} Q_{\Gamma ij} - Q_{Ni}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где M_6 , M_k , M_i — число ветвей, инцидентных балансирующему, генераторному и нагрузочному узлам соответственно; $P_{\Gamma j}$, $P_{\Gamma kj}$, $P_{\Gamma ij}$ — потоки активной мощности в ветвях Γj , kj , ij , относящихся к балансирующему, генераторному и нагрузочному узлам соответственно; $Q_{\Gamma j}$, $Q_{\Gamma kj}$, $Q_{\Gamma ij}$ — то же для потоков реактивной мощности в ветвях Γj , kj , ij .

Потоки мощности можно представить в виде (за положительное направление потока мощности принято направление к узлу):

$$\left. \begin{aligned} P_{ij} &= \left[\frac{U_i^2}{a} \cos \alpha_{ij} - \frac{U_i U_j}{K_{\Gamma}} \cos (\delta_i - \delta_j + \alpha_{ij}) \right] \frac{b}{Z_{ij}}; \\ Q_{ij} &= \left[\frac{U_i^2}{a} \sin \alpha_{ij} - \frac{U_i U_j}{K_{\Gamma}} \sin (\delta_i - \delta_j + \alpha_{ij}) \right] \frac{b}{Z_{ij}} + Q_c, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $Z_{ij} = R_{ij} + j X_{ij} = Z_{ij} e^{j \alpha_{ij}}$ — комплексное сопротивление ветви ij ; K_{Γ} — модуль коэффициента трансформации; $Q_c = 0,5 Y_c \times U_i^2$ — для ВЛ и $Q_c = 0$ — для трансформатора, a и b — коэффициенты.

В выражениях (3) узлом начала ветви ij является узел i , и потоки мощности P_{ij} и Q_{ij} определены со стороны узла i . В том случае $a=1$, $b=-1$. Если потоки мощности P_{ji} и Q_{ji} необходимо определить со стороны узла j ветви ij , то символы i и j меняются местами, $a=K_{\Gamma}^2$, $b=1$. Для ВЛ $K_{\Gamma}=1$.

Система уравнений и неравенств (1) решается в зависимости от назначения расчета и особенностей расчетной схемы, методом Гаусса — Зейделя либо методом Ньютона — Рафсона.

В методе Гаусса — Зейделя использован стандартный алгоритм, не требующий подробных пояснений. Сходимость расчета для большинства расчетных схем ЭЭС удовлетворительная, если рассматриваются режимы сетей 110—220—500 кВ. Метод Гаусса

са — Зейделя сходится плохо (или же расходится) в следующих случаях:

радиальные сети трех-четырёх уровней номинального напряжения;

при наличии в расчетной схеме трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов;

при наличии в расчетной схеме установок продольной емкостной компенсации;

при наличии кабельных вставок или же старых ВЛ со стальными проводами.

Метод Ньютона — Рафсона обеспечивает расчет установившегося режима ЭЭС практически во всех случаях, однако реализуется алгоритмически и программно намного сложнее, чем метод Гаусса — Зейделя.

Обозначим вектор неизвестных параметров через X ; тогда в общем виде уравнения системы (1) можно записать как

$$F(X) = 0. \quad (4)$$

В методе Ньютона — Рафсона на итерации необходимо решать систему уравнений

$$A(X_{(n-1)}) \Delta X_{(n)} = -F(X_{(n-1)}), \quad (5)$$

где $A(X_{(n-1)}) = \frac{\partial F(X)}{\partial X} \Big|_{X_{(n-1)}}$ матрица первых производных (матрица Якоби) вектор-функции $F(X)$ по неизвестным X на итерации n . Элементы этой матрицы получаются дифференцированием уравнений системы (1) по неизвестным параметрам U и δ (Вектор приращений неизвестных X на итерации n определяется как $\Delta X_{(n)} = X_{(n)} - X_{(n-1)}$).

В качестве начального приближения X_0 вектора X приняты заданные модули напряжения генераторных узлов и номинальные напряжения нагрузочных узлов, аргументы узловых напряжений перед началом диалоговых расчетов приравниваются нулю.

При выполнении многовариантных расчетов, связанных с изменениями состава работающего оборудования, схемы сети, при утяжелении исходного режима либо при проверке прохождения суточного графика нагрузки в качестве начального приближения вектора X принимаются результаты расчета предыдущего варианта. Этим существенно экономится машинное время.

Система (5) линейных алгебраических уравнений решается на каждой итерации относительно вектора ΔX методом Гаусса с учетом слабой заполненности матрицы Якоби. Для этого на каждой итерации рассчитываются матрица Якоби и вектор невязок F .

В случае многовариантных расчетов при неизменной схеме сети матрица Якоби не пересчитывается перед началом расчета нового варианта, а принимается равной ее значению на последней итерации предыдущего варианта. Этим также существенно экономится время ЭВМ.

После второй итерации метода Ньютона — Рафсона начинается проверка неравенств в (1). При этом учет ограничений производится методом замены переменных; т. е. если в процессе расчета реактивная мощность $Q_{\Gamma k}$ генераторного узла k станет больше $Q_{\Gamma k \max}$, то $Q_{\Gamma k}$ фиксируется на пределе ($Q_{\Gamma k} = Q_{\Gamma k \max}$), а модуль напряжения U_k этого узла включается в вектор неизвестных параметров X . Следовательно, при недостаточной генерации реактивной мощности в электрической сети модули напряжения генераторных узлов будут снижаться. Поэтому они также проверяются по условию $U_k \geq \gamma U_{k \text{ зад}}$, где $U_{k \text{ зад}}$ — заданный модуль напряжения генераторного узла k .

Сходимость итерационного процесса контролируется по целевой функции

$$J = \sum_{i=1}^{N-1} (P_{\Gamma b i}^2 + Q_{\Gamma b i}^2). \quad (6)$$

Если система (1) совместна (имеет хотя бы одно решение, удовлетворяющее всем равенствам и неравенствам (1)), то итерационный процесс решения системы уравнений (4) сходится с учетом ограничений. Он заканчивается по достижении

$$P_{\Gamma b i} \leq \epsilon_P; \quad Q_{\Gamma b i} \leq \epsilon_Q, \quad (7)$$

где $i=1, \dots, N-1$, ϵ_P и ϵ_Q — максимально допустимые небалансы активной и реактивной мощности во всех узлах энергосистемы.

Если же система (1) несовместна, тогда вследствие дефицита генерации реактивной мощности в электрической сети не выполняется неравенство $U_i \geq \gamma U_{i \text{ ном}}$, $i=1, \dots, N-1$, итерационный процесс прекращается и программа выдает сообщение ДЕФИЦИТ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ. Кроме того, на

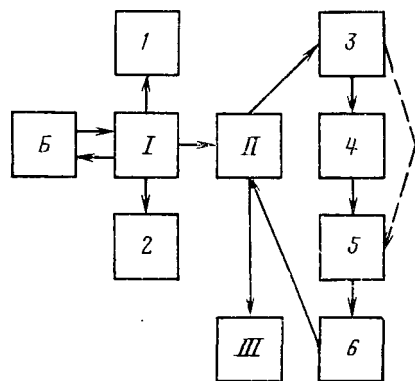


Рис. 1. Структурная схема программы РЕЖИМ

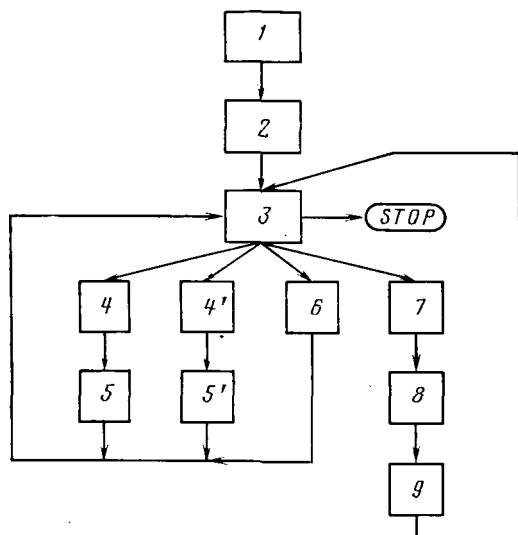


Рис. 2. Схема диалога пользователя и ЭВМ

печать выводятся модули узловых напряжений на последней итерации.

В программе РЕЖИМ расчет ведется в относительных единицах, поэтому перед началом расчета необходимо задать $S_{баз}$ и $U_{баз}$, с помощью которых все параметры схемы замещения и режима приводятся к относительным единицам.

Программная реализация. Программа расчета установившихся режимов ЭЭС РЕЖИМ написана на алгоритмическом языке ФОРТРАН-4 и содержит около 700 операторов, структурно разбитых на управляющую программу и 9 подпрограмм.

Взаимосвязь подпрограмм для варианта программы РЕЖИМ с методом Ньютона — Рафсона показана на рис. 1. В базе данных B (хранится на магнитных дисках) пользователи могут записать до 100 расчетных схем ЭЭС, что позволяет проводить многовариантные расчеты одной и той же схемы без повторного ввода всех исходных данных. Базой данных B управляет подпрограмма I, которая организует ввод исходной информации с первичных носителей или дисплея, вывод ее на печать или дисплей и управляет всем диалогом пользователя с ЭВМ. Подпро-

грамма I осуществляет первичный контроль и диагностику вводимых исходных данных, а подпрограмма 2 подготавливает исходные данные к итерационному расчету, которым управляет подпрограмма II. Подпрограмма 3 вычисляет вектор небалансов $P_{нб}$ и $Q_{нб}$, а подпрограмма 5 — матрицу Якоби. Подпрограмма 4 проверяет выполнение неравенств в системе (1). Система уравнений (5) решается методом Гаусса в подпрограмме 6. В подпрограмме III по полученным из подпрограммы II модулям и аргументам узловых напряжений рассчитываются режимные параметры сети, результаты расчета выводятся на печать или дисплей.

Для программы РЕЖИМ разработана диалоговая система, которая предоставляет пользователям широкие возможности для ввода, редактирования и печати исходных данных, задания номеров устройств ввода исходной информации и вывода результатов расчета.

Схема диалога пользователя с ЭВМ показана на рис. 2. Здесь 1 — директива запуска программы РЕЖИМ и задания номеров устройств ввода-вывода; 2 — запрос номера расчетной схемы ЭЭС в базе данных; 3 — запрос функции программы РЕЖИМ (ввод исходных данных по узлам 4 (ветвям 5) с предварительным напоминанием формата ввода; замена исходных данных по узлам 4' и ветвям 5'; печать исходных данных полностью или частично 6; запоминание исходных данных в базе данных и выход на расчет с запросом коэффициента утяжеления режима 7 (если есть необходимость в этом); затем в блоке 8 запрашиваются $S_{баз}$, $U_{баз}$, e_p и e_q и начинается собственно расчет 9, если расчет не нужен, то программа выходит на STOP.

При подготовке исходных данных используются только два формата языка ФОРТРАН: I2 — для номеров узлов и ветвей, F 6.0 — для ввода исходных схемных и режимных параметров ЭЭС. Опробован также вариант программы РЕЖИМ, где ввод всех данных производится в свободном формате.

При занимаемой оперативной памяти 18 Кбайт предельный объем рассчитываемой сети составляет 50 узлов, 70 ветвей.

Программа РЕЖИМ работает с операционными системами СМТО, ДОС—РВ ЭВМ М—6000 и может в режиме разделения времени обслуживать до восьми пользователей.

Программа РЕЖИМ длительное время используется в дисплейном классе кафедры электрических систем МЭИ, оснащенном ЭВМ М—6000 и 8 терминальными станциями типа СИД—1000. С помощью программы РЕЖИМ выполняются курсовое и дипломное проектирование, учебные и научно-исследовательские работы.

Закключение. Несмотря на некоторые упрощения (отказ от учета потерь на корону в ВЛ, реакторов в узлах, шунтов намагничивания трансформаторов) и ограничения по объему решаемой задачи, вызванные стремлением к экономии оперативной памяти и машинного времени, программа РЕЖИМ обладает всеми основными свойствами современных промышленных программ расчета установившихся режимов ЭЭС. Ее использование на ЭВМ, оснащенной дисплеями, позволяет неквалифицированному пользователю вычислительной техники приобрести навыки общения с ЭВМ и глубже изучить закономерности и характерные особенности установившихся режимов современных, сложных ЭЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по проектированию электроэнергетических систем/Под ред. С. С. Рокотян и И. М. Шапиро. — М.: Энергия, 1977.
2. Идельчик В. И. Расчеты установившихся режимов электрических систем. — М.: Энергия, 1977.
3. Жуков Л. А., Стратан И. П. Установившиеся режимы сложных электрических сетей и систем: Методы расчетов. — М.: Энергия, 1979.

[04.01.83]

Расчет электромагнитного поля в стальной пластине с учетом вихревых токов

АНФИНОГЕНТОВ О. Н., инж., БЕСПАЛОВ В. Я., канд. техн. наук, МОЩИНСКИЙ Ю. А., канд. техн. наук
Москва

Процессы в стальных пластинах при синусоидально изменяющемся во времени магнитном поле подробно рассмотрены в литературе [1—3]. Однако эти методы являются неприемлемыми, если поле создается источником несинусоидального напряжения или тока. Такие переходные процессы характерны для пластин электротехнической стали, из которых набраны магнитопроводы электрических машин, трансформаторов, электромагнитных преобразовательных устройств систем автоматики.

В статье представлен метод расчета электромагнитного поля и его энергетических характеристик в стальной пластине при заданном законе изменения напряженности магнитного или электрического поля на ее поверхности.

Рассмотрим процессы в элементе стальной пластины шириной L_2 и толщиной h , имеющей среднюю магнитную проницаемость материала $\mu = \text{const}$ и электрическую проводимость γ , помещенной во внешнее однородное магнитное поле, изменяющееся во времени по произвольному закону (рис. 1). Сама пластина имеет бесконечные размеры.

Уравнение электромагнитного поля в пластине для плоской электромагнитной волны имеет вид

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = -\delta \mu \frac{\partial H}{\partial t}. \quad (1)$$

Начальные и граничные условия задачи

$$H(x, 0) = 0, \quad H\left(x = \pm \frac{h}{2}, t\right) = H(t), \quad (2)$$

Согласно [4] решение уравнения (1) с начальными и граничными условиями (2) сводится к нахождению решения в виде

$$H(x, t) = \int_0^t H_1(x, t-\tau) \frac{\sigma H(t)}{\partial t} d\tau, \quad (3)$$

где τ — параметр интегрирования; $H_1(x, t)$ — решение аналогичной краевой задачи (1), удовлетворяющей начальному условию $H(x, 0) = 0$ и граничному условию

$$H_1\left(x = \pm \frac{h}{2}, t\right) = 1 = \text{const}. \quad (4)$$

Следовательно, если задача решена при граничном условии (4), ее решение при граничном условии (2), когда напряженность на поверхности пластины есть исходная функция $H(t)$, можно представить в виде (3). Выражение (3) представляет собой интеграл Дюамеля.

Для получения общего вида решения (3) рассмотрим сначала процессы в пластине для случая, когда в момент времени $t=0$ напряженность магнитного поля на ее поверхности изменяется скачком до значения H_0 , т. е. $H(t) = H_0 = \text{const}$.

Применяя метод разделения переменных [4] и используя условия (2), решение уравнения (1) для этого случая получим в виде

$$H(x, t) = H_0 - \frac{4H_0}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k+1)} e^{-\alpha_k t} \cos\left[\frac{(2k+1)}{h} \pi x\right], \quad (5)$$

$$\text{где } \alpha_k = \frac{(2k+1)^2 \pi^2}{\gamma \mu h^2}; \quad k = 0, 1, 2, \dots, \infty.$$

Распределение плотности вихревого тока по толщине пластины подчиняется закону

$$J(x, t) = \frac{\partial H}{\partial t} = \gamma E = \frac{4H_0^2}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k e^{-\alpha_k t} \sin\left[\frac{(2k+1)}{h} \pi x\right]. \quad (6)$$

Потери в пластине от вихревых токов

$$P(t) = \frac{S}{\gamma} \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} J^2(x, t) dx = \frac{8SH_0^2}{\gamma h} \sum_{k=0}^{\infty} e^{-2\alpha_k t}, \quad (7)$$

где $S = L_1 - L_2$ площадь поверхности элемента пластины (рис. 1).

Энергетические соотношения в электромагнитном поле описываются теоремой Умова — Пойнтинга, соответствующей закону сохранения энергии, согласно которой поток вектора Умова — Пойнтинга $\Pi(t)$, входящий внутрь замкнутой поверхности, равен сумме мощности тепловых потерь от вихревых токов $P(t)$ и скорости изменения энергии электромагнитного поля внутри объема пластины $\left[\frac{\partial W_{\text{эм}}}{\partial t}\right] = Q(t)$, ограниченной поверхностью S .

Математическая формулировка теоремы имеет вид

$$\Pi(t) = -\oint \bar{\Pi} d\bar{S} = P(t) + \frac{dW_{\text{эм}}}{dt} = P(t) + Q(t).$$

Поток вектора Умова — Пойнтинга через боковую поверхность элемента пластины

$$\Pi(t) = -2 \oint \bar{\Pi} d\bar{S} = 2 [\bar{E} \times \bar{H}] \bar{S} = \frac{8S}{\gamma h} H_0^2 \sum_{k=0}^{\infty} e^{-\alpha_k t}. \quad (8)$$

Описанный выше процесс перемагничивания пластины при скачкообразном изменении H представляет собой математическую идеализацию, необходимую для решения уравнения (1) в общем виде.

При произвольном законе изменения напряженности магнитного поля на поверхности пластины решение уравнения (1) с учетом выражения (2) и (3) будет иметь вид:

$$H(x, t) = H(t) - \frac{4}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k+1)} \cos\left[\frac{(2k+1)}{h} \pi x\right] \times \\ \times \int_0^t \dot{H}(\tau) e^{-\alpha_k(t-\tau)} d\tau + H(0) \frac{4}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k+1)} \cos\left[\frac{(2k+1)}{h} \pi x\right] \times \\ \times \left[\frac{(2k+1)}{h} \pi x\right]. \quad (9)$$

С целью упрощения выражений в дальнейших выкладках будем полагать $H(0) = 0$, где $H(0)$ значение H при $t=0$.

Мгновенные потери в стальной пластине

$$P(t) = \frac{8S}{\gamma h} \sum_{k=0}^{\infty} \left[\int_0^t \dot{H}(\tau) e^{-\alpha_k(t-\tau)} d\tau \right]^2. \quad (10)$$

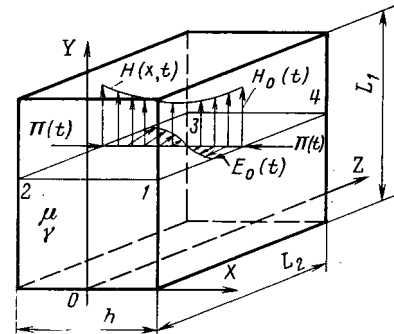


Рис. 1. Электромагнитное поле в ферромагнитной пластине

Мгновенное значение потока вектора Умова — Пойнтинга

$$\Pi(t) = \frac{8S}{\gamma h} H(t) \sum_{k=0}^{\infty} \int_0^t \dot{H}(\tau) e^{-\alpha_k(t-\tau)} d\tau. \quad (11)$$

Рассмотрим несколько конкретных примеров применения метода для расчета потерь в стальной пластине при некоторых законах изменения напряженности магнитного поля во времени.

В случае $H(t) = H_E (1 - e^{-t/T})$

$$P(t) = \frac{8H_E^2}{\gamma h} \sum_{k=0}^{\infty} \left[\frac{e^{-t/T} - e^{-\alpha_k t}}{(\alpha_k T - 1)} \right]^2; \quad (12)$$

$$\Pi(t) = \frac{8H_E^2}{\gamma h} (1 - e^{-t/T}) \sum_{k=0}^{\infty} \left[\frac{e^{-t/T} - e^{-\alpha_k t}}{(\alpha_k T - 1)} \right]. \quad (13)$$

В случае $H(t) = k_0 t$

$$P(t) = \frac{8k_0^2}{\gamma h} \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{1 - e^{-\alpha_k t}}{\alpha_k} \right)^2; \quad (14)$$

$$\Pi(t) = \frac{8k_0^2 t}{\gamma h} \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{1 - e^{-\alpha_k t}}{\alpha_k} \right). \quad (15)$$

При $H(t) = H_m \sin \omega t$

$$P(t) = \frac{8H_m^2}{\gamma h} \sum_{k=0}^{\infty} \left[\frac{\omega}{(\omega^2 + \alpha_k^2)} (\alpha_k \cos \omega t + \omega \sin \omega t - \alpha_k e^{-\alpha_k t}) \right]^2, \quad (16)$$

$$\Pi(t) = \frac{8H_m^2 \sin \omega t}{\gamma h} \sum_{k=0}^{\infty} \left[\frac{\omega}{(\omega^2 + \alpha_k^2)} (\alpha_k \cos \omega t + \omega \sin \omega t - \alpha_k e^{-\alpha_k t}) \right]. \quad (17)$$

Полученные выражения (10) и (11) позволяют производить расчеты и анализ электромагнитных явлений в процессе перемещения магнитопроводов электрических машин и других электромагнитных устройств при произвольных законах изменения напряженности магнитного поля во времени.

При перемещении пластины заданным магнитным потоком граничные условия для уравнения (1) определяются из закона электромагнитной индукции применительно к контуру 1234 (рис. 1).

$$-\oint_e \vec{E} d\vec{l} = -2E_0 L_2 = -\frac{d\Phi}{dt} = -L_2 h \frac{dB_{cp}}{dt}. \quad (18)$$

Тогда напряженность электрического поля на поверхности пластины

$$E_0 = \frac{h}{2} \frac{dB_{cp}}{dt} = \frac{h}{2} \mu \frac{dH_{cp}}{dt}, \quad (19)$$

где B_{cp} — среднее значение индукции по толщине пластины.

Таким образом, задача сводится к решению уравнения (1) при известном законе изменения напряженности электрического поля.

При воздействии ступенчатой функции напряженности электрического поля $E_0 = 1 = \text{const}$ напряженность магнитного поля в пластине в любой момент времени будет [5]

$$H(x, t) = E_0 \left[\frac{2t}{\mu h} + h\gamma \left(\frac{x^2}{h^2} - \frac{1}{12} \right) - \frac{4\gamma}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k} \cos \frac{2\pi k x}{h} e^{-\beta_k t} \right], \quad (20)$$

где

$$-\frac{2k^2\pi^2}{\mu\gamma h^2}, \quad k = 1, 2, 3, \dots, \infty.$$

Плотность вихревого тока

$$J(x, t) = \frac{\partial H}{\partial x} = E_0 \left[\frac{2\gamma x}{h} + \frac{2\gamma}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k} \sin \frac{2\pi k x}{h} e^{-\beta_k t} \right]. \quad (21)$$

При произвольном законе изменения $E_0(t)$ выражение для напряженности магнитного поля и напряженности электрического поля имеет вид

$$H(x, t) = E_0(t) h\gamma \left(\frac{x^2}{h^2} - \frac{1}{12} \right) + \frac{2}{\mu h} \left[\int_0^t \dot{E}_0(\tau) (t - \tau) d\tau + E_0(t) \right] - \frac{h\gamma^2}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k^2} \cos \frac{2\pi k x}{h} \left[\int_0^t \dot{E}_0(\tau) e^{-\beta_k(t-\tau)} d\tau + E_0(0) e^{-\beta_k t} \right]; \quad (22)$$

$$E(x, t) = \frac{2}{h} E_0(t) x + \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k^2} \sin \frac{2\pi k x}{h} \times \left[\int_0^t \dot{E}_0(\tau) e^{-\beta_k(t-\tau)} d\tau + E_0(0) e^{-\beta_k t} \right]. \quad (23)$$

где $E_0(0)$ значение E_0 при $t=0$,

Для упрощения в дальнейшем полагаем $E_0(0) = 0$. Мгновенные значения потерь на вихревые токи в этом случае

$$p(t) = \frac{S}{\gamma} \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} J^2(x, t) dx = Sh\gamma \left\{ \frac{E_0^2(t)}{3} + \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left[\int_0^t \frac{\dot{E}_0(\tau)}{k} e^{-\beta_k(t-\tau)} d\tau \right]^2 \right\}. \quad (24)$$

Мгновенное значение потока вектора Умова — Пойнтинга

$$\Pi(t) = SE_0(t) \left[\frac{4}{\mu h} \int_0^t \dot{E}_0(\tau) (t - \tau) d\tau - \frac{h\gamma}{6} E_0(t) - \frac{2h\gamma}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k^2} \int_0^t \dot{E}_0(\tau) e^{-\beta_k(t-\tau)} d\tau \right]. \quad (25)$$

В качестве примера рассмотрим применение данного метода для предварительного определения потерь на вихревые токи в магнитопроводе асинхронного двигателя в процессе пуска.

Система дифференциальных уравнений, используемая для расчета переходных процессов в асинхронном двигателе, имеет вид [6]

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_\alpha^s}{dt} &= U_\alpha^s - R_s i_\alpha^s; & \frac{d\psi_\beta^s}{dt} &= U_\beta^s - R_s i_\beta^s; \\ \frac{d\psi_\alpha^R}{dt} &= -i_\alpha^R R_R + \omega_R \psi_\beta^R; & \frac{d\psi_\beta^R}{dt} &= -i_\beta^R R_R - \omega_R \psi_\alpha^R; \\ \frac{J}{p} \frac{d\omega_R}{dt} &= \frac{3}{2} p M (i_\alpha^R i_\beta^s - i_\alpha^s i_\beta^R). \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

Решая систему (26) при нулевых начальных условиях, определяем значение результирующего потокоцепления обмотки статора:

$$\Psi_m = \sqrt{\Psi_{m\alpha}^2 + \Psi_{m\beta}^2} \quad (27)$$

и магнитный поток в воздушном зазоре

$$\Phi_\delta = \frac{\Psi_m}{k_{081} w_1}, \quad (28)$$

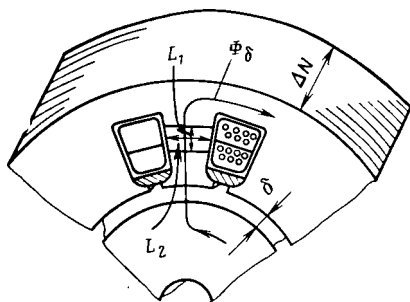


Рис. 2. К расчету потерь на вихревые токи в асинхронном двигателе

где

$$\psi_{m\alpha} = \psi_{\alpha}^s - (L_S - M) i_{\alpha}^s;$$

$$\psi_{m\beta} = \psi_{\beta}^s - (L_S - M) i_{\beta}^s;$$

$k_{0s1}\omega_1$ — эффективное число витков обмотки фазы статора.

Зная закон изменения Φ_{δ} во времени, нетрудно найти законы изменения магнитных потоков в зубцах и ярмах статора и ротора с учетом того, что частота потока в роторе зависит от его частоты вращения;

$$\Phi_{\delta R}(t) = \Phi_{\delta}(t) \frac{\sin(\varphi + \alpha_2)}{\sin(\omega t + \alpha_1)}, \quad (29)$$

где $\Phi_{\delta R}(t)$ — мгновенное значение основного потока в роторе;

$$\varphi = \int_0^t (\omega - \omega_R) dt + \varphi_0 — \text{угл поворота ротора; } \omega — \text{синхронная}$$

угловая частота вращения поля; φ_0 — начальный угол; α_1, α_2 — углы сдвига оси поля, относительно осей фаз статора и ротора в момент $t = 0$.

При расчетах предполагается, что напряженность и индукция поля в пределах одного полюсного деления распределены равномерно, т. е. являются прямоугольными функциями пространственной координаты.

Магнитная цепь по пути основного магнитного потока разбивается на участки, в пределах которых магнитная индукция считается постоянной (рис. 2). Зная закон изменения потока в поперечном сечении данного участка, определяем индукцию, а затем с помощью кривой намагничивания для заданной электротехнической стали находим соответствующие законы изменения во времени напряженности магнитного поля.

Вычислив по формуле (24) или приближенно по формуле (10) потери на единицу поверхности пластины и умножив их на площадь боковой поверхности рассматриваемого участка S_i и число пластин в пакете N , определим мгновенные потери в данном поперечном сечении магнитной цепи машины

$$p_i(t) = p(t) S_i N, \quad (30)$$

где $S_i = L_1 L_2$ (рис. 2).

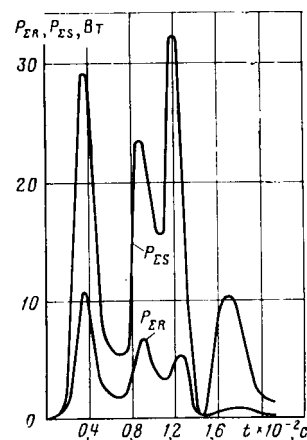


Рис. 3. Графики зависимости $P_{\Sigma S}, P_{\Sigma R}$ от времени

Суммирование полученных таким образом потерь в стали для всех участков магнитной цепи $p_i(t)$ дает возможность определить закон изменения потерь в магнитопроводе асинхронного двигателя во время пуска

$$P_{\Sigma j}(t) = \sum_{i=1}^n P_i(t), \quad j = S, R. \quad (31)$$

Зависимости $P_{\Sigma j}(t)$ в режиме пуска для статора $P_{\Sigma S}$ и ротора $P_{\Sigma R}$ асинхронного двигателя 4А80А2УЗ мощностью 1,5 кВт приведены на рис. 3. Магнитная система машины выполнена из электротехнической стали марки 2013, толщина листов 0,35 мм.

Разработанная методика позволяет производить расчет потерь на вихревые токи в ферромагнитных участках различных электротехнических устройств в переходных режимах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нейман Л. Р., Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники. Т. 2—М.: Энергия, 1967.
2. Лейтес Л. В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. М.: Энергия, 1981.
3. Герасимович А. Н., Бобко Н. Н. Расчет переходного процесса в магнитопроводах с учетом гистерезиса. — Известия вузов. Энергетика, 1977, № 6.
4. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. — М.: Наука, 1972.
5. Черкашин Ю. С. Процесс и энергия намагничивания листового магнитопровода при прямоугольном напряжении. — Электричество, 1978, № 6.
6. Копылов И. П., Мамедов Ф. А., Беспалов В. Я. Математическое моделирование асинхронных машин. — М.: Энергия, 1969.

[20.06.83]

УДК 621.372.001.24

Способ расчета параметров пассивной электрической цепи заданной структуры

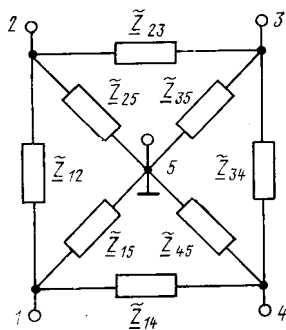
ШАШУРИН А. К., канд. техн. наук, ПЕТРОПАВЛОВСКИЙ А. Ю., инж.

Москва

В ряде случаев, например при изменении параметров элементов электрической цепи с течением времени, возникает необходимость расчета действительных значений этих параметров без распайки электрической схемы. Далее предлагается способ, использующий для решения этой задачи в качестве исходных данных значения входных сопротивлений электрической цепи относительно всех узлов. Данная задача является обратной по

отношению к широко известной задаче определения входных сопротивлений пассивной схемы по известным значениям ее сопротивлений.

Описываемый способ применим для любой пассивной электрической цепи с заданной структурой, состоящей как из активных, так и реактивных элементов. Предполагается, что схема цепи приведена к виду, когда между двумя любыми узлами име-



ется только одно, в общем случае комплексное сопротивление, значение которого и определяется. Пример пятиузловой схемы, удовлетворяющей данным требованиям, представлен на рисунке.

Суть способа заключается в следующем. Для схемы заданной структуры в произвольном порядке нумеруются все узлы от 1 до n . Один из узлов, например n -й, принимается за базисный. В соответствии с методом узловых потенциалов записывается матричное уравнение

$$\mathbf{I} = \mathbf{Y}\mathbf{U}, \quad (1)$$

где $\mathbf{I}$ — вектор-столбец токов размерностью $[n-1]$; $\mathbf{Y}$ — матрица проводимостей ветвей размерностью $[(n-1) \times (n-1)]$; $\mathbf{U}$ — вектор-столбец узловых потенциалов размерностью $[n-1]$.

Матрица $\mathbf{Y}$ является симметричной относительно главной диагонали и представляется в виде

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_{12} + y_{13} + \dots + y_{1n} & -y_{12} & \dots & -y_{1(n-1)} \\ -y_{12} & y_{12} + y_{23} + \dots + y_{2n} & \dots & -y_{2(n-1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -y_{1(n-1)} & -y_{2(n-1)} & \dots & y_{1(n-1)} + \dots + y_{(n-2)(n-1)} + y_{n(n-1)} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где y_{ij} — искомая в данной задаче комплексная проводимость ветви между узлами i и j , связанная с соответствующим комплексным сопротивлением ветви между теми же узлами формулой

$$y_{ij} \tilde{z}_{ij} = 1. \quad (3)$$

Для рассматриваемых схем для $i = \overline{1, n}$ и $j = \overline{1, n}$ имеем

$$y_{ij} = \begin{cases} y_{ji} & \text{при } i \neq j; \\ 0 & \text{при } i = j. \end{cases}$$

Так как структура схемы и базисный узел остаются неизменными при определении входных сопротивлений относительно всех пар узлов, то для каждого из них в уравнении (1) будет меняться только вид вектора-столбца токов $\mathbf{I}$, в то время как матрица $\mathbf{Y}$ в виде (2) и вектор-столбец узловых потенциалов $\mathbf{U}$ будут оставаться неизменными.

Как показано в приложении, для матрицы $\mathbf{Y}$ вида (2) из известных численных значений входных сопротивлений $\tilde{z}_{ij}$ относительно всех пар узлов можно составить матрицу $\mathbf{A}$ размерностью $[(n-1) \times (n-1)]$, связанную с матрицей $\mathbf{E}$ известным соотношением

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{E},$$

где $\mathbf{A}^{-1}$ — матрица размерностью $[(n-1) \times (n-1)]$, обратная по отношению к матрице $\mathbf{A}$; $\mathbf{E}$ — единичная матрица размерностью $[(n-1) \times (n-1)]$.

Числовая матрица $\mathbf{A}$ составляется из значений $\tilde{z}_{ij}$ в виде (см. приложение):

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \tilde{z}_{1n} & \frac{1}{2}(\tilde{z}_{1n} + \tilde{z}_{2n} - \frac{1}{2}(\tilde{z}_{1n} + \tilde{z}_{(n-1)n} - \dots - \tilde{z}_{12})) & \dots & -\tilde{z}_{1(n-1)} \\ \frac{1}{2}(\tilde{z}_{1n} + \tilde{z}_{2n} - \tilde{z}_{12}) & \tilde{z}_{2n} & \dots & \frac{1}{2}(\tilde{z}_{2n} + \tilde{z}_{(n-1)n} - \dots - \tilde{z}_{2(n-1)}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{1}{2}(\tilde{z}_{1n} + \tilde{z}_{(n-1)n} - \frac{1}{2}\tilde{z}_{2n} + \tilde{z}_{(n-1)n} - \dots - \tilde{z}_{1(n-1)}) & -\tilde{z}_{2(n-1)} & \dots & \tilde{z}_{(n-1)n} \end{bmatrix} \quad (4)$$

и является симметричной относительно главной диагонали. Для матрицы $\mathbf{A}$ можно найти обратную матрицу $\mathbf{A}^{-1}$, между элементами которой и элементами матрицы $\mathbf{Y}$, записанной в виде (2), существует взаимно-однозначное соответствие, исходя из чего можно определить искомые проводимости y_{ij} . Проводимости ветвей, не связанных непосредственно с n -м (базисным) узлом, определяются из соотношения

$$y_{ij} = A_{ij}^{-1}, \quad (5)$$

где $i = \overline{1, n-1}$, $j = \overline{1, n-1}$, $i \neq j$. Проводимости ветвей между i -м узлом и базисным вычисляются для $i = \overline{1, n-1}$ по формуле

$$y_{in} = A_{ii}^{-1} + \sum_{j=1, j \neq i}^{n-1} A_{ij}^{-1}. \quad (6)$$

По формуле (3) определяются искомые комплексные сопротивления ветвей $\tilde{z}_{ij}$.

Пример. Для схемы (см. рисунок), состоящей из чисто активных сопротивлений R_{ij} , известны значения входных сопротивлений R_{ij} относительно всех пар узлов; $R_{12}=8,33$ Ом, $R_{13}=4,6$ Ом, $R_{14}=6,82$ Ом, $R_{15}=3,88$ Ом, $R_{25}=5,77$ Ом, $R_{24}=4,17$ Ом, $R_{25}=2,5$ Ом, $R_{34}=4,72$ Ом, $R_{35}=1,71$ Ом, $R_{45}=1,6$ Ом.

С учетом чисто активного характера сопротивлений во всех формулах необходимо заменить обозначения $\mathbf{Y}$, y , z на $\mathbf{G}$, G соответственно.

Матрица проводимостей $\mathbf{G}$ согласно (2) записывается следующим образом:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_{12} + g_{14} + g_{15} & -g_{12} & 0 & -g_{14} \\ -g_{12} & g_{12} + g_{23} + g_{25} & -g_{23} & 0 \\ 0 & -g_{23} & g_{23} + g_{34} + g_{35} & -g_{34} \\ -g_{14} & 0 & -g_{34} & g_{45} + g_{14} + g_{34} \end{bmatrix},$$

Матрица $\mathbf{A}$ согласно (4) представляется в виде

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} R_{15} & \frac{1}{2}(R_{15} + R_{25} - R_{12}) & \frac{1}{2}(R_{15} + R_{35} - R_{13}) & \frac{1}{2}(R_{15} + R_{45} - R_{14}) \\ \frac{1}{2}(R_{15} + R_{25} - R_{12}) & R_{25} & \frac{1}{2}(R_{25} + R_{35} - R_{23}) & \frac{1}{2}(R_{25} + R_{45} - R_{24}) \\ \frac{1}{2}(R_{15} + R_{35} - R_{13}) & \frac{1}{2}(R_{25} + R_{35} - R_{23}) & R_{35} & \frac{1}{2}(R_{35} + R_{45} - R_{34}) \\ \frac{1}{2}(R_{15} + R_{45} - R_{14}) & \frac{1}{2}(R_{25} + R_{45} - R_{24}) & \frac{1}{2}(R_{35} + R_{45} - R_{34}) & R_{45} \end{bmatrix},$$

а с учетом заданных численных значений

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 3,88 & -0,975 & 0,495 & -0,671 \\ -0,975 & 2,5 & -0,782 & 0,415 \\ 0,495 & -0,782 & 1,710 & -0,705 \\ -0,671 & 0,415 & -0,705 & 1,600 \end{bmatrix}.$$

Матрица $\mathbf{A}^{-1}$, обратная к матрице $\mathbf{A}$, вычисляется известными в линейной алгебре методами и для данного примера имеет вид:

$$\mathbf{A}^{-1} = \begin{bmatrix} -0,3 & -0,1 & 0 & -0,1 \\ -0,1 & 0,5 & -0,2 & 0 \\ 0 & -0,2 & 0,8 & -0,3 \\ -0,1 & 0 & -0,3 & 0,8 \end{bmatrix}.$$

Далее, применяя для каждой строки вычисленной матрицы формулы (5) и (6), получаем следующие значения проводимостей ветвей g_{ij} :

$$g_{12}=g_{14}=g_{15}=0,1 \text{ Сим}; \quad g_{23}=g_{25}=0,2 \text{ Сим}; \quad g_{34}=g_{35}=0,35 \text{ Сим}; \\ g_{45}=0,4 \text{ Сим}; \quad g_{13}=g_{24}=0.$$

Затем по формуле (3) находим значения искомых сопротивлений $\bar{R}_{ij}$:
 $R_{12}=R_{14}=R_{15}=10 \text{ Ом}; R_{23}=R_{25}=5 \text{ Ом}; R_{34}=R_{35}=3,33 \text{ Ом};$
 $R_{45}=2,5 \text{ Ом}.$

Вывод. Предложенный способ нахождения комплексных сопротивлений схемы заданной конфигурации по известным значениям входных сопротивлений относительно всех пар узлов дает точное решение, не вызывая при этом принципиальных трудностей и не требует значительных затрат времени. Формализация при составлении матриц $\mathbf{Y}$ и $\mathbf{A}$ позволяет, во-первых, не решая электротехнических уравнений, непосредственно получать результаты в матричной форме, а во-вторых, легко автоматизировать процесс решения.

Приложение. Решение матричного уравнения (1) относительно k -го узлового потенциала имеет вид

$$\dot{U}[k] = \sum_{i=1}^{n-1} \dot{I}_i \frac{\Delta_{ki}}{\Delta_Y}, \quad (7)$$

где $\dot{I}_i$ — внешний ток, связанный с i -м узлом; Δ_{ki} — алгебраическое дополнение главного определителя матрицы $\mathbf{Y}$ для элемента Y_{ki} ; Δ_Y — главный определитель матрицы $\mathbf{Y}$.

В пассивной электрической цепи входное сопротивление $\underline{z}_{kj}$ относительно k -го и j -го узлов:

$$\underline{z}_{kj} = \frac{\dot{U}[k] - \dot{U}[j]}{\dot{I}}, \quad k < j < n, \quad (8)$$

где $\dot{I}$ — внешний ток, втекающий в k -й узел и вытекающий из j -го узла. Подставляя в (8) значения $\dot{U}[k]$ и $\dot{U}[j]$, выраженные по формуле (7), и сокращая числитель и знаменатель на $\dot{I}$, получим

$$\underline{z}_{kj} = \frac{\Delta_{kk}}{\Delta_Y} + \frac{\Delta_{jj}}{\Delta_Y} - \frac{\Delta_{kj}}{\Delta_Y} - \frac{\Delta_{jk}}{\Delta_Y}. \quad (9)$$

Для симметричных относительно главной диагонали матриц, какой является матрица $\mathbf{Y}$, справедливо равенство¹:

$$\Delta_{kj} = \Delta_{jk}, \quad (10)$$

поэтому с учетом (10) формула (9) переписывается в виде

$$\underline{z}_{kj} = \begin{cases} \frac{\Delta_{kk}}{\Delta_Y} + \frac{\Delta_{jj}}{\Delta_Y} - 2 \frac{\Delta_{kj}}{\Delta_Y}, & k < j < n; \\ \frac{\Delta_{kk}}{\Delta_Y}, & k < j = n. \end{cases} \quad (11)$$

$$(12)$$

¹ Рублев А. Н. Курс линейной алгебры и аналитической геометрии. — М.: Высшая школа, 1972.

Записывая согласно (11)—(12) выражения для входных сопротивлений $\underline{z}_{ij}$ относительно всех узлов и считая их известными, получим систему алгебраических уравнений с неизвестными вида $\frac{\Delta_{ij}}{\Delta_Y}$:

$$\left. \begin{aligned} \underline{z}_{12} &= \frac{\Delta_{11}}{\Delta_Y} + \frac{\Delta_{22}}{\Delta_Y} - 2 \frac{\Delta_{12}}{\Delta_Y} \\ \underline{z}_{13} &= \frac{\Delta_{11}}{\Delta_Y} + \frac{\Delta_{33}}{\Delta_Y} - 2 \frac{\Delta_{13}}{\Delta_Y} \\ &\dots \dots \dots \\ \underline{z}_{1n} &= \frac{\Delta_{11}}{\Delta_Y} \\ &\dots \dots \dots \\ \underline{z}_{(n-1)n} &= \frac{\Delta_{(n-1)(n-1)}}{\Delta_Y} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Из системы (13) легко определяются численные значения всех неизвестных:

$$\frac{\Delta_{ij}}{\Delta_Y} = \begin{cases} \frac{1}{2} (\underline{z}_{in} + \underline{z}_{jn} - \underline{z}_{ij}) & \text{при } i \neq j; \\ \underline{z}_{in} & \text{при } i = j. \end{cases} \quad (14)$$

Из численных значений $\frac{\Delta_{ij}}{\Delta_Y}$ составим матрицу следующим образом:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta_{11}}{\Delta_Y} & \frac{\Delta_{21}}{\Delta_Y} & \dots & \frac{\Delta_{(n-1)1}}{\Delta_Y} \\ \frac{\Delta_{12}}{\Delta_Y} & \frac{\Delta_{22}}{\Delta_Y} & \dots & \frac{\Delta_{(n-1)2}}{\Delta_Y} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\Delta_{1(n-1)}}{\Delta_Y} & \frac{\Delta_{2(n-1)}}{\Delta_Y} & \dots & \frac{\Delta_{(n-1)(n-1)}}{\Delta_Y} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Исходя из равенства (10), можно сделать вывод, что

$$A_{ij} = A_{ji},$$

т. е. матрица $\mathbf{A}$, как и матрица $\mathbf{Y}$, симметрична относительно главной диагонали.

Как показано в упомянутой книге, матрица $\mathbf{A}$, составленная из чисел Δ_{ij}/Δ_Y в виде (15), является обратной по отношению к искомой матрице $\mathbf{Y}$. Матрица $\mathbf{A}$, элементы которой выражены через известные входные сопротивления $\underline{z}_{ij}$ по формулам (14), будет иметь вид (4).

[26.02.82]



ВНИМАНИЮ руководителей организаций и предприятий!

Энергоатомиздат напоминает, что заканчивается прием заказов на плакаты по технике безопасности на 1984 г.

Просим ускорить оформление заказов.

Заказы направлять по адресу:

113114, Москва, М-144, Шлюзовая набережная, 10, Энергоатомиздат, Отдел распространения.

Справки по телефону: 235-91-38.

Издательство

100-летие Правил устройства электротехнических установок

Правила устройства электротехнических установок являются сводом основных положений, требований и рекомендаций, которыми руководствуются при проектировании и сооружении, и частично при эксплуатации электротехнических объектов в целях обеспечения их надежности и безопасности. Первые правила вышли 100 лет назад, с тех пор они перерабатывались, совершенствовались вместе с развитием электроэнергетики, изменяли свою структуру и названия. История развития правил, как всякая история, представляет большой интерес для настоящего и будущего.

В 1866 г. в Петербурге было основано Русское техническое общество (РТО). Его целью являлось содействие развитию техники в России. Членами общества являлись инженеры и ученые, промышленники и чиновники различных технических ведомств.

В 1879 г. П. Н. Яблочков основал первый в России электротехнический завод, год спустя Д. А. Лачинов опубликовал первое в мире исследование о передаче электрической энергии на дальние расстояния, В. Н. Чиколев начал производство дуговых ламп с изобретенным им дифференциальным регулятором. Одна за другой возникали небольшие домовые установки для питания электрического освещения. Открывались широкие перспективы применения электричества. В 1880 г. группа членов общества во главе с названными выше учеными явилась инициатором организации VI электротехнического Отдела РТО.

VI Отдел РТО начал активно действовать во всех направлениях использования электрической энергии, в том числе и в отношении регламентации условий ее применения. В феврале 1883 г. им был составлен и опубликован в журнале «Электричество» проект «Правил для безопасного общественного и частного пользования электричеством». Правила состояли из 28 пунктов, разделенных на четыре части. В первой части приведены указания о помещениях (ширина проходов, вентиляция) электрических установок, во второй части — меры пожарной безопасности и защиты людей, в третьей — технические требования к нагреванию и изоляции проводников, к способам их прокладки, в четвертой — требования к «коммутаторам», выключателям, приборам, а также к шкафам, ящикам и колодцам, в которых они размещаются.

Правила имели общегосударственный характер, возник вопрос об их утверждении, для чего они были направлены в министерство внутренних дел (МВД). Последнее переслало их в Министерство почт и телеграфов, которое вместо утверждения правил, составило свою редакцию, не получившую признания. Правила стали действовать, как утвержденные Советом РТО.

В 1891 г. была составлена и утверждена в том же порядке переработанная редакция правил. Под названием «Временные правила относительно мер предосторожности при устройстве и пользовании электрическим освещением» она опубликована в журнале «Электричество» (1891 г., № 9—10). К тому времени электрическое освещение нашло очень широкое применение: в Петербурге работали две первые электростанции общественного пользования; была пущена царскосельская станция переменного однофазного тока (1885 г.); учреждено Общество электрического освещения 1886 г. М. О. Доливо-Добровольским сооружена первая трехфазная линия электропередачи 15000 В длиной 175 км от гидроэлектростанции в Лауфене на Неккаре до Франкфурта — на — Майне, им же созданы трехфазный трансформатор и асинхронный двигатель (1889 г.); Н. Н. Бернадсом изобретена электросварка (1878 г.). Электроэнергетика начала развиваться быстрыми темпами, росло число электроустановок, увеличились их мощность и напряжение. Увеличился также объем новой редакции правил — до 68 пунктов. Структура Правил по сравнению с первым изданием была несколько изменена: в первой части приведены общие указания, во второй — требования к «Электрическим станциям и источникам электричества» (в том числе к паровым котлам и двигателям), в третьей — к канализации тока (проводам и кабелям, прокладываемым внутри помещений и по улицам и проездам), в четвертой — к источникам света (преимущественно к дуговым лампам). Как и в правилах 1883 г., сохранялись требования к обслуживающему персоналу — по возрасту (не моложе 15 лет) и здоровью.

В правилах 1891 г. говорится, что действие их распространяется на напряжение до 150 В, в отношении применения более высоких напряжений имелось лишь общее указание об ограждении в таких установках. В 1895 г. VI отдел РТО расширил действие этих правил на установки с напряжением до 3000 В и принял решение об организации постоянной комиссии по улучшению и развитию правил.

В этот период на электростанциях и предприятиях начал широко использоваться трехфазный ток: в 1883 г. — электростанция в Новороссийске; в 1896 г. — на Охтенском заводе в Петербурге; в Москве — на пряже-красильной фабрике и на зернохранилище Московско-Казанской железной дороги; в 1897 г. — электростанция на Раушской набережной мощностью 3300 кВт при напряжении сети 2000 В; в 1899 г. в Таллине — завод «Вольта», в Москве — трамвай и заводы «Мос-электрик», «Электроугли», в следующем году — завод «Изолятор», в Киеве — кабельный завод. Развивалась электропромышленность, сооружались электростанции во всех крупных городах страны. Даже в таких удаленных местах, как Ленские золотые прииски, была сооружена электростанция трехфазного тока и линия электропередачи напряжением 10 000 В длиной 13 км.

Стало очевидным, что новая, бурно развивающаяся отрасль народного хозяйства требует руководства в практическом и научном отношениях. Правительство не создало важности этой задачи и даже отказалось от утверждения правил, обеспечивающих надежность и безопасность электроустановок. За это дело взялась общественность — VI Отдел РТО, выдвинувший предположение организовать Всероссийские электротехнические съезды как периодически (раз в два года) действующий орган, руководящий развитием электропромышленности и электротехники как науки.

Был составлен проект положения о Всесоюзных электротехнических съездах (ВЭС), утвержденный затем советом РТО и МВД. I ВЭС был создан в 1899—1900 г. в Петербурге. На съезде были подведены итоги 100-летнего развития электротехники, рассмотрен вопрос о введении в практику электротехников метрических мер и системы электрических единиц, принятый на международном конгрессе в 1881 г., проект терминологии в области электротехники и ряд других вопросов. Среди последних видное место занимало рассмотрение «Правил для пользования электрическими устройствами, работающими токами низкого, повышенного и высокого напряжения», «Правил взаимоотношения между установками и проводами сильного и слабого тока», вопросы об инспекции за электротехническими устройствами и об их испытаниях и приемке.

Проекты правил были переданы постоянному комитету ВЭС для доработки и для представления II ВЭС на утверждение.

II ВЭС собрался в 1901—1902 гг; на нем были рассмотрены вопросы развития в России производства генераторов, электродвигателей и других электротехнических «приспособлений». II ВЭС утвердил «Правила для пользования электрическими устройствами, работающими токами низкого, повышенного и высокого напряжения». В представленный проект были внесены существенные изменения, например, для низкого напряжения предел был увеличен с 150 до 250 В, а для повышенного — с 600 до 750 В.

В период между II и III ВЭС постоянный комитет отредактировал правила и издал сборник, в который вошли также «Правила для пользования электрическими устройствами городских электрических железных дорог» и «Правила, определяющие взаимное отношение между проводами сильных токов и проводами слабых токов». Сборник имел общее название «Правила для пользования электрическими устройствами». Правила не были утверждены МВД. Тем не менее, ссылки на них вводились многими министерствами, общественными учреждениями и частными лицами в договоры и соглашения с контрагентами при сооружении многих электрических установок. В результате МВД было вынуждено признать правила.

Кроме указанных, II ВЭС одобрил «Правила для отделения от проводов лиц, пострадавших от действия электрического тока», «Наставления для подания первой помощи в несчастных

случаях, происшедших от действия электрического тока (до прихода врача). «Правила для исследования изолирующих галаш и перчаток».

По инициативе II ВЭС были начаты исследования по нормализации сопротивления изоляции в электрических установках, по испытаниям электрических машин и трансформаторов, по защите зданий от ударов молнии и по сбору статических данных о несчастных случаях в электрических установках.

III ВЭС, проходивший в 1903—1904 гг., включил в свою программу рассмотрение добавлений и поправок к «Правилам пользования электрическими установками». Съезд постановил разделить эти правила на «Правила устройства» и «Правила безопасности», а каждое из них — на два отдела для низкого и высокого напряжения.

Специально организованная комиссия отредактировала и опубликовала в первую очередь «Правила для устройства электрических сооружений, действующих токами низкого напряжения». По сравнению с прежними правилами содержание и объем новых были значительно расширены. В первой главе формулировались общие положения и давались основные определения. Во второй главе содержались требования к электромашинам помещениям и их электрооборудованию: генераторам, трансформаторам, аккумуляторам, распределительным устройствам. Отметим, что нормировалось сопротивление изоляции обмоток в 100 кОм. В третьей главе обобщались требования к электроаппаратуре: выключателям, штепселям, предохранителям, громотводам, осветительной арматуре и светильникам. Четвертая глава содержала требования к проводам — воздушным, подземным и подводным, и к внутренним проводкам. Всего в правилах было 114 параграфов. Кроме этого, постоянный комитет III ВЭС разработал и опубликовал еще 14 частных правил относительно установок в театрах, рудниках, железных дорогах, пороходельательных заводах, выставках и т. д.

Развитие электротехники предъявляло все более высокие требования к правилам в отношении учета новых достижений и строгости формулировок. К 1907 г. начали вступать в работу мощные электростанции с турбогенераторами. Первый турбогенератор мощностью 680 кВт был установлен на Фонтанке в Петербурге в 1904 г.; в 1905 г. в Москве на электростанции на Раушской набережной вступили в работу два турбогенератора по 2000 кВт каждый, турбогенераторы начали работать на московской трамвайной станции; в 1906 г. мощные электростанции начали работать в Баку, электростанции общего пользования возникали одна за другой во всех крупных городах России. Напряжение сетей возросло: кабельных до 6000 В, воздушных — до 20 000 В.

Перед IV ВЭС встала задача коренного усовершенствования правил устройства электрических установок, всех частных правил, и тщательной координации содержащихся в них требований.

Анализ аналогичных зарубежных правил показал, что наиболее полными из них являются германские. Кроме того, наибольшее количество электрооборудования в Россию поступало из Германии. Поэтому в основу правил устройства электрических установок были положены германские правила, переработанные с учетом опыта русских электротехников и условий России.

Съезд принял решение не представлять правила устройства на утверждение правительственных органов (за исключением правил безопасности), а рассматривать их как одобренные и рекомендованные ВЭС для всеобщего руководства. Съезд дал указания постоянному комитету о продолжении его работы по внесению в правила одобренных им дополнений и изменений.

К V ВЭС были подготовлены только изменения и дополнения к правилам устройства и к другим правилам, так как между IV и V ВЭС прошел всего год. Все принятые изменения и дополнения были опубликованы в виде отдельной брошюры.

Работу над электротехническими правилами продолжил VI ВЭС (27 декабря 1910 г. — 7 января 1911 г.), который утвердил новую их редакцию, так было уточнено понятие «низкое напряжение» — не более 250 В между проводом и землей и не более 500 В между проводами. В разделе «Высокое напряжение» детализированы требования к сопротивлению изоляции в зависимости от напряжения в пределах от 250 В до 1000 В. При более высоких напряжениях наименьшее допустимое сопротивление определялось в 500 Ом на 1 В. Детально нормировались нагрузки на провода и кабели для напряжений 700, 3000 и 10 000 В.

Был введен третий раздел «Правила эксплуатации электрических устройств сильных токов».

VI съезд поручил Постоянному комитету ВЭС продолжать разработку дополнений и уточнений к Правилам устройства и уполномочил вносить в них изменения с последующим утверждением очередным ВЭС.

Постоянный комитет ВЭС во исполнение поручения IV съезда в 1912 г. опубликовал «Правила и нормы для электротехнических устройств сильных токов», утвержденных VI ВЭС. В этот сборник, кроме «Правил устройства электротехнических сооружений низкого и высокого напряжения», вошли также нормы для испытания электрических машин и трансформаторов, нормы для проводов, «Правила безопасности для театров, цирков, кинематографов и им подобных помещений для общественных собраний», «Нормы для устройств линий воздушных проводов», «Наставления для обращения с электрическими проводами и принадлежностями при тушении пожаров».

В этот период электротехника и электроэнергетика развивались очень быстрыми темпами. В Петербурге велось сооружение районной электростанции «Уткина заводь» (ныне «Красный Октябрь»), в Москве началось строительство районной станции «Электропередача» (ныне ГРЭС им. Классона) и проектировались две мощные электростанции — «Новая Трамвайная» и электростанция в Филях, продолжалось строительство городских электростанций почти во всех городах России, вытеснявших сотни мелких «домовых» и «квартирных» блок-станций, шло сооружение промышленных электростанций значительной мощности. Начали работать сети 30 кВ, в 1914 г. вступила в работу электропередача напряжением 70 кВ, развивались городские сети 6 кВ. Возникла острая потребность в директивных документах, регламентирующих проектирование, сооружение и эксплуатацию электрических устройств.

VII ВЭС, проходивший в Москве в декабре 1912 г. — январе 1913 г., рассмотрел проекты переработанных правил и норм и дал указания о их редактировании и выпуске нового издания. Согласно этому решению, постоянный комитет ВЭС опубликовал в 1914 г. пятое издание правил и норм в виде сборника объемом 244 страницы.

Это издание представляло собрание директивных документов, которыми руководствовались при проектировании, строительстве и эксплуатации электрических установок, начиная с 1914 г. до Октябрьской революции и первые три года после нее. Приведем его содержание, несколько сокращая наименования и не повторяя в них, что правила относятся к установкам высокого и среднего напряжения, а нормы — к элементам их электрооборудования.

В сборник входили правила: безопасности; устройства — общие для всех установок; частные: для рудников, театров, цирков, кинематографов; правила эксплуатации — общие, частные: для электрических трамваев, для измерения силы света ламп накаливания; защиты трубопроводов от вредного влияния токов электрических железных дорог; указания по защите электроустановок от перенапряжения; по защите зданий от молнии; по подаче первой помощи при поражениях электрическим током; по включению электродвигателей в электросети общего пользования.

Были опубликованы следующие нормы: для устройств воздушных линий; для проводниковой меди, проводов; испытания листового железа; испытания электрических машин и трансформаторов; установочного материала, для цоколей ламп накаливания, штепсельных контактов, изолирующих труб; электрического оборудования судов.

Как видно из приведенного перечня, содержание правил и норм, утвержденных VII ВЭС, относилось как к самим установкам, так и к их оборудованию и было направлено не только для электростанций и их сетей, но и для электротехнических заводов.

Отметим, что в правилах и нормах была сделана попытка установить нормы на частоту тока (50 и 25 периодов в секунду), и на напряжения. В качестве нормальных указывались напряжения: 110, 220, 500, 1000, 2000, 3000, 5000 В. В отношении напряжений правила отставали от жизни — в то время уже развивались сети 6, 30 и была сооружена линия 70 кВ.

«Правила устройства электрических установок» издания 1914 г. были последним дореволюционным выпуском. Первая мировая война приостановила электроэнергетическое строительство, электростанции и их сети работали на износ. В конце войны возник и топливный голод. С первых же дней советской власти одной из ее важнейших забот явилось обеспечение электроснабжения. Первым решением представилось «кольцевание электростанций» — оно позволило загрузить наиболее экономичные из них или наиболее обеспеченные топливом. Одновременно было начато строительство ряда новых районных электростанций, в том числе — Каширской и Шатурской ГРЭС.

Для руководства электроэнергетикой был создан необходимый аппарат. Возникла нужда в высококвалифицированном консультативном органе, каким было раньше РТО. Но РТО и его VI отдел оказались под влиянием контрреволюционных

членов, бывших промышленников и это общество было распущено. Заменял его Центральный электротехнический совет (ЦЭС), положение о котором было утверждено 5 октября 1918 г. В него вошли и лучшие специалисты из РТО, полностью ставшие на путь, указанный советской властью. Они не могли примириться с тем, что родная страна закабалется иностранцами — в центре и на севере утверждаются немцы, на Урале — англичане, на юге — французы и бельгийцы.

Идеи В. И. Ленина об электрификации России захватили широкие круги населения и в том числе лучших специалистов-энергетиков, вошедших в состав ЦЭС. Как только с интервенцией было покончено, В. И. Ленин приступил к реализации своей идеи электрификации, была организована Комиссия ГОЭЛРО, в которую вошли многие члены ЦЭС. По инициативе В. И. Ленина был созван VIII ВЭС (1—10 октября 1921 г.) для рассмотрения плана ГОЭЛРО.

Подготовительная работа в области электротехнических правил и норм была проведена подсекцией ЦЭС, организовавшем объединенный комитет по электротехническим правилам и нормам (ОКЭН). Этот комитет подготовил еще до съезда и издал в 1921 г. «Правила безопасности и правила устройства для электроэнергетических сооружений низкого и высокого напряжений».

Правила безопасности и правила устройства, а также ряд норм (на изоляционные масла, на трансформаторы: выключатели, магнитную сталь, поправки и добавления к другим нормам и правилам), были утверждены ВЭС, который поручил ЦЭС опубликовать их. Вначале публикация велась отдельными выпусками. В 1924 г. «Правила безопасности и правила устройства» были опубликованы отдельно от норм, как утвержденные Народным комиссариатом труда. В 1925 г. был опубликован полный сборник Электротехнических правил и норм с указанием, что они одобрены VIII ВЭС и ЦЭС.

Осуществление плана ГОЭЛРО потребовало нового издания правил, и в 1927 г., накануне первой пятилетки, электротехнические правила и нормы были переизданы с рядом изменений и добавлений. В них был включен новый раздел «Основные правила о мерах и весах» об измерениях в метрических единицах, в том числе времени, электрических величин, света, температуры (по 1000°-ной шкале) и т. п. Были добавлены указания по защите от перенапряжений, включены некоторые нормы «для предметов электрического оборудования» и исключены правила устройства, относящиеся к трамваю.

В 1928 г. был созван (вместо очередного IX ВЭС) 1-й Всесоюзный энергетический съезд, имевший задачей обобщение опыта электростроительства, ведущегося по планам ГОЭЛРО и 1-й пятилетки, подведение итогов научно-технической работы, определение перспектив и дальнейших направлений электрификации. Электрификация СССР из проблемы отдаленного будущего превратилась в реальную действительность. Завершалось энергостроительство по вводу мощности в 1 200 000 кВт, что вместе с уже существующей должно было составить 1 500 000 кВт, предусмотренных планом ГОЭЛРО. Протяженность линий электропередачи составила более 2000 км, а вместе со строящимися — более 3400 км.

Видное место на 1-м энергетическом съезде занял вопрос о правилах и нормах. Проф. М. А. Шателен на общем собрании съезда выступил с докладом «Нормализация и стандартизация в области электротехники». Была организована секция для рассмотрения правил и норм, изменений и дополнений к существующим и разработки новых. К этому времени начал действовать Государственный комитет стандартов, организованный в 1925 г., и часть норм, относящихся к электрооборудованию, была опубликована в виде стандартов.

Решения, принятые 1-м энергетическим съездом по правилам и нормам, были опубликованы в 1929 г. в виде сборника, содержащего лишь те правила, в которые были внесены изменения в количестве 24 пунктов, и новые нормы (стандарты). Эти правила были изданы с пояснениями (к части параграфов), разработанными по поручению ЦЭС Л. П. Подольским под редакцией М. А. Шателена.

В 1931 г. опубликован «Сборник электротехнических правил и норм», включивший в себя все правила и нормы, одобренные съездом или ЦЭС в последней редакции.

Энергетический съезд состоялся накануне бурного развития отечественной электропромышленности. До Октябрьской революции в России были созданы заводы практически по всем видам электрооборудования. Но они принадлежали «Русским обществам» Сименс — Шукерт или АЭГ, т. е. иностранному капиталу, и в основном занимались сборкой аппаратов из частей, получаемых из-за рубежа. Тем не менее, анализ состояния

нашей электропромышленности привел создателей плана ГОЭЛРО к выводу: «Наличие собственной электротехнической промышленности и перспективы заграничного товарообмена не внушают особых опасений по проведению программы электрификации». До 1928 г. наше электростроительство опиралось на импорт электрооборудования из-за рубежа, с этого времени страна переходит на оборудование советских заводов.

Напомним, что в 1925 г. Харьковский электромеханический завод изготовил трансформатор мощностью 10 000 кВт; в 1928 г. завод «Электроаппарат» — первый выключатель на 110 кВ; в 1930 г. завод «Электросила» — первые турбогенераторы мощностью 25 000 и 50 000 кВт. Электропромышленность окрепла и стала важной отраслью народного хозяйства. Соответственно этому произошло разделение правил, относящихся к электроэнергетике от норм (стандартов) электропромышленности.

Если в «Сборнике правил и норм» издания 1931 г. они публикуются еще вместе, то в выпуске «Электротехнических правил и норм» издания 1933 г. происходит их разделение на отдельные книги, причем нормы заменяются стандартами.

Электротехнические правила и нормы 1933 г. именовались пятым изданием, хотя по существу, учитывая выпуск 1921 г., они являлись шестым изданием после Октябрьской Революции. В них было три раздела: «Основные правила о мерах и весах», «Правила безопасности» и «Правила и нормы для устройства и эксплуатации электротехнических сооружений». Электротехнические правила и нормы охватывали электроустановки разного рода, характерным для них было совместное изложение требований к электробезопасности, к самим устройствам в техническом отношении и к эксплуатации электрических установок.

Правила и нормы были переизданы еще в 1937 г. без существенных изменений, они являлись важнейшим директивным документом по всем основным вопросам электростроительства и электроэксплуатации в области электрификации страны в период 2-й и 3-й пятилеток, во время Великой Отечественной войны и некоторое время после нее. Значение этого документа трудно переоценить.

В послевоенный период электроэнергетическое строительство и электрификация страны возобновились, сразу набрав высокие темпы. Возникли новые подходы и новые методы решения ряда вопросов. В предшествующий период были разработаны и некоторые новые руководящие документы: в 1934 г. опубликованы инструкции по безопасности эксплуатации электрических установок и электростанций, подстанций и электросетей. В 1940 г. были утверждены и вышло первое издание «Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей». Все это потребовало коренной переработки Правил устройства электроустановок.

Была создана комиссия из представителей Наркомата электростанций и Наркомстроя (авторы данной статьи были членами этой комиссии). Комиссию возглавил И. А. Сыромятников.

Разработанные комиссией «Правила устройства электроустановок» (ПУЭ) публиковались отдельными выпусками по мере готовности. В 1949 г. была издана первая часть, в 1950 г. — вторая. В дальнейшем ПУЭ издавались одной книгой, всего было выпущено четыре издания, последнее в 1966 г. Объем ПУЭ составил 40 печатных листов, они подразделялись на 7 разделов. О содержании ПУЭ и о внесенных в Правила изменениях по сравнению с довоенным изданием можно судить по их оглавлению, приводимому ниже в сокращенном виде.

Раздел I (общие правила) содержал общие положения и определения; требования к электрическим сетям и электрооборудованию; к выбору проводников по нагреву, экономической плотности тока и по короне; к выбору аппаратов и проводников по условиям короткого замыкания; к учету энергии; к электрическим измерениям, к заземлениям; к приемно-даточным испытаниям.

Раздел II (канализация электроэнергии) включал предписания по устройству электропроводок; токопроводов; кабельных и воздушных линий до и выше 1000 В.

Раздел III (защита и автоматика) содержал требования релейной защите, автоматике, вторичным цепям.

Раздел IV (распределительные устройства и подстанции) — требования к распределительным устройствам до и выше 1000 В.

Раздел V (электросиловые установки) — требования к электромашиным помещениям, к генераторам и синхронным компенсаторам, к электродвигателям, электрооборудованию кранов, лифтов; к конденсаторным установкам.

Раздел VI (Электрическое освещение) давал предписания по устройству внешнего, внутреннего и рекламного освещения, осветительной по арматуре.

Раздел VII (электрооборудование специальных установок) включал предписания по электрооборудованию жилых и общественных зданий, зрелищных предприятий, взрывоопасных, пожароопасных, термических, сварочных установок и электроустановок торфодобычи.

Первое издание ПУЭ было рассмотрено на Всесоюзном совещании, организованном ВНИТОЭ в декабре 1950 г., в котором приняли участие более 400 делегатов от различных учреждений и организаций. На совещании был зачитан доклад проф. М. А. Шателена «Исторический обзор развития электротехнических правил в СССР». Нужно отметить, что М. А. Шателен являлся организатором и вдохновителем разработки ПУЭ.

Всесоюзное совещание рекомендовало внести в Правила ряд изменений и отметило плодотворность общественного просмотра ПУЭ.

В настоящее время закончен пересмотр ПУЭ 1976 г. (5-е издание), опубликованных в виде отдельных выпусков. В 1984 г.

намечается выпуск ПУЭ одной книгой. Пересмотр правил был произведен без участия ВНИТОЭ, о чем можно пожалеть, так как общественность могла бы способствовать повышению качества ПУЭ. Не может не вызвать сожаления и длительность перерыва между 4- и 5-м изданиями ПУЭ.

Мы считаем, что после выхода в свет полного издания ПУЭ целесообразно организовать его широкое обсуждение, причем организацию обсуждения должно провести ВНИТОЭ. При этом желательно привлечь заинтересованные организации и ведомства, так как для них эти правила обязательны.

В заключение приведем выдержку из передовой статьи, опубликованной в журнале «Электричество» (1948 г., № 10): «...Создание электротехнических правил и норм, отвечающих насущным запросам развития народного хозяйства и находящимся на уровне современной передовой техники, является одной из крупных и важных задач, связанных с дальнейшим ростом электрификации СССР». Решение этой задачи заслуживает большего участия электротехнической общественности, чем то, которое ей уделяется в последние годы.

ГРУДИНСКИЙ П. Г., ФАЕРМАН А. Л.



УДК [621.311+621.313.322]:061.3

Некоторые достижения и проблемы техники передачи электрической энергии и конструирования крупных генераторов

(К итогам сессии СИГРЭ-82, Париж, 31 августа—10 сентября 1982 г.)

Линии сверх- и ультравысокого напряжения (СВН и УВН). В технике передачи электрической энергии увеличение напряжения — наиболее радикальное средство повышения пропускной способности ЛЭП, их к. п. д. и экономичности. Почти все европейские страны имеют электрические сети 400 кВ. Электрические сети 500 (550) кВ получили широкое развитие в США, Канаде, Японии, Бразилии, Австралии, Новой Зеландии, АЕР и других странах, где своевременно оценили преимущества сооружения ЛЭП 500 кВ и вклад СССР в их освоение. Как это следует из материалов сессии СИГРЭ-82, в 1981 г. только в четырех странах (Канаде — в 1965 г., СССР — в 1967 г., США — в 1969 г., ВНР — в 1978 г.) были созданы ЛЭП переменного тока 735—765 кВ. В настоящее время общая протяженность этих ЛЭП достигла 11 тыс. км (из них в СССР — 3,2 тыс. км). В ближайшие 10 лет ЛЭП 750 кВ с помощью СССР будут построены в ряде стран СЭВ: ПНР, ГДР, ВНР и СРР. На сессии СИГРЭ-82 было сообщено, что ведут проектирование ЛЭП 750 кВ СФРЮ, Испания, Норвегия, а Швеция строит первую ЛЭП 800 кВ.

В будущем будут освоены также ЛЭП УВН — 1000 кВ и выше. В этом направлении по-прежнему наиболее интенсивно работают СССР, США и Италия. Две фирмы США «Дженерал Электрик» и «Вестингауз», а также крупнейшая государственная энергосистема Бонневильское энергетическое управление (ВРА) работают над следующим ступенем номинального напряжения — 1200 кВ. Однако сроки проектирования ЛЭП УВН в США сильно растянулись: первые ЛЭП 1200 кВ должны войти в строй не ранее 1986—1989 гг., хотя ВРА, фирмы «Дженерал Электрик», «Вестингауз» и др. за последние 10 лет провели большой объем исследований, необходимых для проектирования и создания ЛЭП УВН.

АЕР, занимавшаяся совместно с АСЕА (в части основного оборудования) подготовкой к созданию ЛЭП 1800 кВ и построившая с этой целью опытную и демонстрационную установку, решила ограничиться освоением к 1990—1995 гг. ЛЭП с номинальным напряжением 1500 кВ.

В Италии построен исследовательский центр в Суверето под Миланом, где исследованиям охвачены все основные проблемы проектирования воздушных линий УВН. Исследования в Суверето направлены на сооружение к 2000 г. электрических сетей 1000 кВ в Италии, а также на возможное их внедрение в развивающихся странах (Бразилия и др.) Япония создает стенд, а затем опытную линию 1200 кВ для испытаний изоляции и элементов оборудования этого класса напряжения, в том числе для гибридных и полностью герметизированных элегазовых под-

станций. При этом Япония рассчитывает использовать передачи УВН как в своей стране (в небольшом объеме), так и поставлять элегазовое оборудование УВН в другие страны.

Советская делегация сообщила на пленарном заседании сессии СИГРЭ-82 [1], что в СССР ведется строительство ЛЭП 1150 кВ Казахстан — Урал: в 1982 г., в основном, завершено сооружение I участка Экибастуз — Кокчетав длиной 500 км, ведется сооружение подстанций и II участка Кокчетав — Кустанай. Таким образом, СССР сохраняет лидерство в технике передачи на дальние и сверхдальние расстояния.

Из обсуждавшихся на сессии СИГРЭ-82 материалов наибольший интерес представляют следующие.

В [2] сообщено о разработке трансформатора 1100 кВ с номинальной мощностью группы 3 ГВ·А. Трансформатор предназначен для подстанций с газоиолрированным (гибридным) оборудованием и снабжен в связи с этим вводом элегаза — масла (такое же исполнение намечено и для реакторов 1100 кВ). Трансформатор 1100 кВ имеет 3 обмотки: 1100, 525 и 147 (63) кВ с мощностями соответственно 1000, 1000 и 300 МВ·А. Трансформатор защищен от грозовых и коммутационных перенапряжений ограничителями перенапряжений, имеет регулировку по напряжению в пределах $\pm 5\%$.

В ряде докладов и дискуссионных выступлениях в группе 22 были освещены проработки, проекты и уже построенные линии электропередач переменного тока повышенной пропускной способности с суженным коридором, занимаемым линией. В этом смысле достаточно типичным был французский доклад 31—04 [3]. В докладе показано, что увеличение напряжения линии с 90 до 800 кВ снижает удельный размер коридора (S) примерно в 10 раз. Интересным представляется выполненный в том же докладе анализ весьма жесткой и практически линейной связи между S и стоимостью 1 км линий различного номинального напряжения.

Большое число докладов и выступлений в дискуссионных группах было посвящено весьма актуальному для очень многих стран вопросу создания воздушных ЛЭП СВН с уменьшенным влиянием на окружающую среду (с точки зрения радиопомех, шума, электрического поля), а также выявлению таких конструктивных линий, зона отчуждения для которых минимальна. С этой точки зрения характерным был доклад 22—04, относящийся к воздушным линиям 400 кВ Западного Берлина [4], где в соответствии с нормами устойчивый радиоприем должен быть обеспечен в зоне от крайних проводов. Зоны влияния для ВЛ 400 кВ разного конструктивного выполнения показаны в табл. 1. Она наименьшая у линии с проводом 4×240/40; для

выполнения норм потребовалось снизить максимальную напряженность электрического поля на поверхности провода до 22—24 кВ/см. С точки зрения перегрузочной способности, которая может быть реализована у линии 400 кВ в аварийных ситуациях в энергосистеме, предпочтение также отдано варианту линии с четырьмя проводами в расщепленной фазе, так как более тонкие провода лучше охлаждаются.

Вопрос о влиянии электрического поля на человека и животных был в центре внимания группы 36. Наиболее интересным с этой точки зрения был доклад 36—01, представленный ФРГ [5]. В нем были изложены основные результаты лабораторных исследований на животных и людях. Были сообщены результаты биохимических, общеклинических и психологических исследований людей, экспонированных в полях. Испытуемые добровольцы были разбиты на две одинаковые по численности группы: опытную и контрольную. Основные серии наблюдений были выполнены на группе испытуемых из 30 человек в поле 20 кВ/м. Каждый испытуемый экспонировался в электрическом поле в течение недели. Длительность ежедневной экспозиции составляла от 6 до 22 ч (испытуемые и спали в электрическом поле). Обследование испытуемых проводилось ежедневно, иногда по нескольку раз в день. Детально изучалась кровь. Измерялись давление и температура тела, а для оценки влияния поля на центральную нервную систему — скорость реакции глаза. Время реакции, а также кривые ЭЭГ и ЭКГ регистрировались во время экспозиции и передавались по телеметрическим каналам. В результате тщательного статистического анализа всех параметров не было обнаружено влияния электрического поля ни при напряженности 10 кВ/м, ни при 20 кВ/м.

В дискуссионной группе 36 было сделано интересное сообщение американским медиком Фуллертоном (АЕР). Он указал на то, что в США с 1973 г. ведутся систематические наблюдения за персоналом, обслуживающим подстанции и линии 765 кВ. Кроме того, под эгидой EPRI ведутся исследования влияния электрического поля на животных и людей. Ни в одном исследовании не было отмечено прямого негативного влияния электрического поля на здоровье людей. В начале 1982 г. этот вывод был оформлен специальным документом Министерства здравоохранения США. В той же группе представитель Англии Норрис (Энергетическое управление) сообщил об опытах, проведенных на добровольцах в лабораторных условиях. Электрическое поле напряженностью до 20 кВ/м создавалось с помощью расщепленного провода, расположенного над испытуемыми. Вся медицинская информация о состоянии последних с помощью датчиков и аппаратуры, используемой космонавтами, поступала на пульт непосредственно в процессе длительной (в течение нескольких часов) и повторяющейся экспозиции. Опыты привели к выводу, что при напряженности 10 кВ/м не было никаких признаков влияния электрического поля, а при напряженности 20 кВ/м все наблюдавшиеся эффекты были на грани их отсутствия. Объем выполненной в этом направлении исследований в США, ФРГ, Франции, Швеции и др. странах за последние годы настолько велик, что описанные в более ранних работах весьма слабые эффекты, как теперь ясно, получили неправильную трактовку. В настоящее время СИГРЭ обратилось к МЭК с просьбой разработать соответствующие нормативы по этому вопросу для всех стран.

Большую научную и практическую ценность представляет доклад 22—02 [6], написанный по результатам многолетних исследований, проводившихся в США, Канаде и европейских странах с целью анализа эффективности активной борьбы с «пляской» проводов на воздушных линиях. В этом докладе, опирающемся на огромный статистический материал, показано, что наиболее эффективны тяжелые маятники и демпферы аэродинамического типа, которые снизили максимальный размах «пляски» в 2—4 раза, особенно эффективно подавлялась «пляска» у расщепленных проводов. Материалы этого доклада открывают возможности для дальнейшей компактизации воздушных линий.

В докладе 23—01 [7] рабочей группы 23.03 дан обстоятельный обзор современного промышленного производства элегазовых КРУ. По данным этой группы ведущие зарубежные фирмы с 1968 г. поставили оборудование для 43 тыс. ячеек открытых подстанций 123—550 кВ и около 6 тыс. ячеек элегазовых КРУ, при этом в последние 5 лет уже каждая пятая подстанция выполнялась в элегазе. В Японии нашли широкое применение гибридные распределительные устройства, при сооружении которых используются секции элегазовых КРУ.

Сессия СИГРЭ-82 зафиксировала быстрый прогресс в области силовых кабелей. Созданы кабели 400 и 500 кВ с площадью сечения медной токоведущей жилы до 2500 мм², что обеспечивает отответствие пропускной способности таких колебаний мощ-

Число проводов в расщепленном проводе (шаг расщепления $d=40$ см)	Тип провода	Максимальный ток, соответствующий температуре 80 °С, А	Максимальная пропускная способность при этой температуре, ГВт	Максимальная напряженность поля на проводе E_m , кВ/см	Расстояние от линии, на котором выдерживаются нормы, м
2	564/72	1050	1,455	$16,55\sqrt{2}$	35
3	380/50	840	1,746	$15,54\sqrt{2}$	25
4	240/40	645	1,787	$15,63\sqrt{2}$	15

ности наиболее крупных энергетических блоков на электрических станциях. Разработаны кабели с водяным охлаждением, что позволяет еще в несколько раз повысить их пропускную способность. Проводившийся за последние 10—15 лет поиск изоляционных материалов с пониженным коэффициентом потерь ($\epsilon \tan \delta$) дал важные практические результаты: была получена и применена бумага с $\tan \delta=0,15\%$, $\epsilon=3,3 \epsilon_p$ (вместо 0,3 % и 3,7 ϵ_0 у обычной бумаги); появилась бумага марки PPL с полипропиленовой пленкой внутри, у которой $\tan \delta=0,08\%$ и $\epsilon=2,7 \epsilon_p$, что открывает перспективы для создания кабелей 500—1150 кВ.

Сверхпроводниковые генераторы. Разработка сверхпроводниковых генераторов ведется в настоящее время в Англии, Италии, КНР, СССР, США, Франции, ФРГ, ЧССР, Швейцарии, Японии. Все известные достижения в этой области дают основания предполагать, что эти машины в 90-е годы сравняются по мощности с турбогенераторами традиционного исполнения. На сессии вопросам создания сверхпроводниковых машин было посвящено 3 доклада. В докладах [8] и [9] рассмотрено современное состояние и перспективы развития сверхпроводниковых генераторов в СССР, США, Франции, Японии. Доклад [10] был посвящен созданию экспериментальной базы для исследования мощных сверхпроводниковых машин и турбогенераторов с полным водяным охлаждением в ФРГ.

К настоящему времени определились два основных направления работ по созданию опытно-промышленных образцов мощных сверхпроводниковых синхронных генераторов:

Создание опытных машин возрастающей мощности от нескольких мегаватт до нескольких десятков мегаватт. В СССР были созданы генераторы мощностью 1,5 МВ·А, 2 МВт и 20 МВ·А; в США — 2 и 5 МВ·А, создаются генераторы 10 и 20 МВ·А; в Японии машины мощностью 6, 25, 30 и 50 МВ·А. На основе опыта, приобретенного в процессе изготовления и испытаний этих машин, создаются опытно-промышленные образцы мощностью несколько сот мегаватт (300 МВт в СССР и 300 МВ·А в США, планируются работы над машиной класса 500 МВ·А в Японии). В ЧССР заканчиваются работы по созданию машин 5 МВ·А.

Этап создания экспериментальных машин мощностью в несколько мегаватт исключен из национальных программ стран Западной Европы. Работе над генераторами мощностью в несколько сот мегаватт предшествует создание крупных экспериментальных моделей роторов. В Англии разработан проект модели ротора и опытного турбогенератора мощностью 120 МВт. В ФРГ создается 35-тонная модель ротора и в конце 80-х годов начнется изготовление криогенератора мощностью 1000 МВ·А. Во Франции создана и испытана модель ротора для криогенератора мощностью 1200 МВт с частотой вращения 3000 об/мин; ведутся работы над проектом опытного генератора мощностью 250 МВт. В Италии ведутся работы над опытным ротором с наружным диаметром 1,3 м и частотой вращения 3000 об/мин. Основные характеристики нескольких упомянутых машин даны в табл. 2.

Работы по созданию крупных сверхпроводниковых синхронных машин основаны на углубленных фундаментальных исследованиях. Такие работы проводятся в направлении: создания сверхпроводников с более высокими критическими параметрами, в особенности с высокой критической температурой; исследования свойств конструкционных и изоляционных материалов при низких температурах; разработки конструкционных материалов с улучшенными характеристиками; исследования теплофизических и гидродинамических свойств гелия при вращении; обеспечения механической прочности роторов при

Таблица 2

Наименование параметров	Страны									
	Япония	США	США	СССР	Япония	Япония	Франция	Франция	США	СССР
Мощность	6,25 МВ·А	10 МВ·А	20 МВ·А	20 МВ·А	30 МВ·А	50 МВ·А	Ротор	250 МВт	300 МВ·А	300 МВт
Напряжение, кВ	2,64	13,8	3,6	6,3	11	16	—	12,6	24	20
Схема соединения обмотки статора	—	треуг.	звезда	звезда	—	—	—	—	звезда	звезда
Ток возбуждения при номинальной нагрузке, А	—	939	500	1610	—	—	5000	815	1450	—
Максимальная индукция магнитного поля, Тл	—	4,83	5,9	4,73	—	—	1,5	4,5	6,4	—
Индуктивное сопротивление										
x_d , о. е.	0,40	0,269	0,389	0,333	0,60	0,31	—	0,79	0,329	0,36
x_d' , о. е.	0,23	0,203	0,324	0,262	0,30	0,24	—	0,52	0,263	0,27
x_d'' , о. е.	0,15	0,139	0,164	0,162	0,25	0,14	—	0,22	0,176	0,17
Частота вращения, об/мин	3600	3600	3600	3000	3600	3600	3000	3000	3600	3000
Обмотка возбуждения:										
внутренний диаметр, м	—	0,2066	0,1016	0,195	0,40	0,34	—	—	—	—
наружный диаметр, м	—	0,2874	0,254	0,348	0,50	0,40	—	—	—	—
Активная длина, м	—	0,7925	1,32	1,1	—	—	1,0	1,56	1,98	2,4
Экран:										
внутренний диаметр, м	—	0,3318	0,334	0,574	—	—	—	0,99	0,7209	—
наружный диаметр, м	—	0,3418	0,437	0,584	—	—	—	1,10	0,729	—
Ротор:										
наружный диаметр, м	0,39	—	0,437	0,59	0,73	0,60	1,06	—	—	1,06
Обмотка якоря:										
внутренний диаметр, м	0,40	0,4684	0,428	0,64	—	—	—	1,54	1,1938	—
наружный диаметр, м	—	0,5996	0,712	0,80	—	—	—	1,84	1,654	—
Число витков в фазе	—	204	14	24	—	—	—	22	20	—
Сердечник статора:										
внутренний диаметр, м	—	0,66	0,756	0,81	—	—	—	1,84	1,7851	—
наружный диаметр, м	—	1,06	1,218	1,2	—	—	—	2,48	2,6416	—

анормальных режимах работы и поведения сверхпроводниковых турбогенераторов при работе в энергосистеме. Наряду с созданием опытных роторов и машин ведутся работы по исследованию отдельных элементов сверхпроводниковых турбогенераторов на макетах и моделях.

Принципиальная конструктивная схема всех разрабатываемых машин одинакова: турбогенератор имеет вращающуюся сверхпроводящую обмотку возбуждения и неподвижную медную обмотку статора, расположенную в немагнитном активном слое. Однако конструктивные решения отдельных узлов имеют существенные различия; в результате рассматриваются два варианта криогенной схемы, три конфигурации обмотки возбуждения, два типа сверхпроводников и три семейства статоров.

В большинстве проектов жидкий гелий подается в полость ротора при атмосферном давлении, охлаждает обмотку возбуждения, в виде пара попадает в центральную полость, предварительно пройдя по теплообменникам, и выбрасывается на периферию ротора при комнатной температуре. Внутри ротора существует поверхность раздела между газом и жидкостью, а скорость потока гелия составляет около 5 г/с. Во французском проекте гелий вводится в полость ротора под давлением, превышающим критическое (2,2 бар). Наружная силовая оболочка не содержит теплообменников. В этом случае термосифонный эффект за счет тепловых и электрических потерь ускоряет циркуляцию сверхкритического гелия и скорость потока может превысить 100 г/с. Разница температур и давлений на входе и выходе гелия невелика.

Что касается конструкции обмотки возбуждения, то здесь имеются различия как в конфигурации катушек, так и в способе их охлаждения и крепления. Катушки выполняются плоскими трековыми (машины 20 МВ·А в СССР и США, 50 МВ·А в Японии) или седлообразными, причем последние могут располагаться как в пазах, отфрезерованных в полой металлической цилиндрической машине 30 МВ·А в Японии, 300 МВ·А в США, 300 МВт в СССР), так и между двумя металлическими цилиндрами (Франция). Плоские катушки позволяют упростить технологию изготовления обмотки, в случае седлообразных катушек улучшаются условия охлаждения лобовых частей. Пропитка эпоксидным компаундом исключает относительные перемещения сверхпроводника внутри обмотки, а пористая непротитанная обмотка обеспечивает хороший контакт между сверхпроводником и охлаждающим гелием. Обмотки возбуждения машин

20 МВ·А СССР и США, 50 МВ·А в Японии, 300 МВт в СССР имеют пропитку эпоксидным компаундом. Без пропитки выполняются обмотки для турбогенераторов 10 и 300 МВ·А в США и 30 МВ·А в Японии.

Для изготовления катушек обмотки возбуждения используется в основном сверхпроводник из ниобий — титана (СССР, США, ФРГ, Франция); в Японии, кроме того, использовался Nb — Ti — Zr и Nb — Ti — Ta, а в машине 30 МВ·А две из восьми катушек выполнены из Nb₃Sn, имеющего более высокие критические параметры. Ограниченное использование этого сверхпроводника в турбогенераторах объясняется отсутствием достаточного опыта работы с ним. В настоящее время находят применение два типа сверхпроводника. В первом случае это провод прямоугольного сечения, состоящий из нескольких сот твистированных сверхпроводящих нитей, размещенных в медной матрице. Диаметр нитей колеблется от 30 до 40 мкм, коэффициент заполнения от 1:1,6 до 1:4,5 (СССР, США, Япония). Недостатком такого сверхпроводника является чувствительность к изменяющимся магнитным полям, что требует создания надежной системы экранов.

С целью упрощения технологии изготовления ротора французские специалисты предпочли усложнить сам сверхпроводник, но сделать его менее чувствительным к переменным полям. Проводник имеет форму кабеля, состоящего из стренг, каждая из которых содержит несколько тысяч волокон, уложенных в медные и мельхиоровые матрицы. Диаметр таких волокон может быть очень мал — до 5 мкм. Проводники такого типа могут выдерживать изменение поля до 4 Тл/с и тока до 25000 А/с без значительного ухудшения критических параметров. Специалисты ФРГ выбрали промежуточное решение: кабель, подобный проводнику, предложенному Францией, но с матрицей из чистой меди. Создание сверхпроводников такой конструкции открывает благоприятные возможности для разработки сверхпроводящих обмоток статоров на переменном токе.

Система экранов зависит от способа охлаждения и типа сверхпроводника. В настоящее время созданы и разрабатываются роторы с двойными и тройными системами экранов в различных сочетаниях. Одна из важнейших задач, возникающих при конструировании ротора, — устранение высоких механических напряжений, возникающих в результате различия коэффициентов теплового расширения материалов, из которых изготовлена оболочка и бандажный цилиндр с тепловыми мо-

стами. Эти задачи решаются по-разному. Так, в машине 30 МВ×ХА (Япония) применение сплавов титана для наружного и внутреннего цилиндров позволяет осуществить их сварное соединение, при этом уровень механических напряжений не превышает допустимых значений. В генераторе 50 МВ·А цилиндры изготавливаются из нержавеющей стали. В этом случае снижение механических напряжений достигается за счет применения двоянных подшипников со стороны выводов.

Узел ввода гелия всегда располагается со стороны возбуждателя. Высокая эффективность узла подачи может быть достигнута при использовании неподвижной консольной трубы с вакуумной изоляцией, строго концентричной по отношению к вращающейся трубе, с дополнительным центрирующим подшипником. Все конструкции сверхпроводниковых машин, за исключением одной, используют магнитоэлектрические уплотнения, которые обеспечивают эффективную защиту от загрязнения и утечки гелия. В варианте французского турбогенератора (модель ротора и проект машины мощностью 250 МВт) специфические особенности системы охлаждения позволяют сконструировать узел подачи гелия с радиальным люфтом до 1 мм во всех направлениях. Герметичность обеспечивается обычными малыми уплотнениями.

Основные особенности статоров беспазовых конструкций сверхпроводниковых генераторов связаны с необходимостью снижения дополнительных потерь в обмотке и обеспечением ее надежного крепления. В настоящее время существуют две группы таких статоров. Первая основана на традиционной конструкции. В этом случае увеличение количества меди в активной зоне приводит к существенному удлинению лобовых частей, что, однако, не мешает иметь в этих обмотках повышенный коэффициент заполнения медью и высокую линейную нагрузку. Вторая группа конструкций предусматривает принципиально новую геометрию обмоток, вынесенных в воздушный зазор; это концентрическая (или плоская) спиральная обмотка в турбогенераторе США мощностью 300 МВ·А и распределенная спиральная обмотка (турбогенератор мощностью 10 МВ·А в США, 50 МВ·А в Японии, английские проекты).

К настоящему времени экспериментально исследованы: опытный турбогенератор мощностью 20 МВ·А в СССР, узлы генераторов мощностью 20 МВ·А в США, 30 и 50 МВ·А в Японии, опытный сверхпроводниковый ротор диаметром 1,06 м во Франции. Над созданием опытно-промышленных образцов в настоящее время работают в СССР (300 МВт) и США (300 МВ·А), а в Англии, Франции, ФРГ и Японии ведутся разработки проектов турбогенераторов мощностью в несколько сот мегаватт. Работы по созданию сверхпроводникового турбогенератора мощностью 1200 МВт начаты в СССР. В Италии и ФРГ создаются крупные модели сверхпроводниковых роторов.

С целью проведения всесторонних исследований мощных турбогенераторов фирмой Крафтверкунин (ФРГ) разработана многоэтапная программа, предусматривающая создание уникального экспериментального стенда, на котором будут испытываться агрегаты с полным водяным охлаждением и сверхпро-

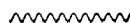
водниковые машины. В процессе работы на стенде будут созданы комбинации различных вариантов роторов и статоров, дающих возможность образовать шесть вариантов опытных генераторов. На последней стадии этой многоэтапной программы предусматривается создание сверхпроводникового генератора мощностью 1000 МВ·А.

Опыт создания крупных моделей сверхпроводниковых роторов и сверхпроводниковых турбогенераторов в несколько единиц и десятков мегаватт подтвердил возможность разработки мощных сверхпроводниковых машин. На основе полученных экспериментальных данных становится реальной перспектива создания в 90-е годы машин класса 1000 МВт с переходом в дальнейшем к разработке еще более мощных агрегатов. В этих условиях разнообразие национальных программ делает исключительно важным международное сотрудничество, представляющее собой уникальный эксперимент международного масштаба. Объединенные усилия всех участников этого эксперимента вносят большой вклад в создание электрических машин будущего.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Opening ceremony and half — day information session CIGRE — 82. — Electra, 1982, № 85.
2. Miyachi I., Ozaki Y., Yasuda M. e. a. Development of UHV transformers in Japan. — CIGRE, 1982, R. 12—03.
3. Perzos H., Maury F. System development policy limiting space requirements. — CIGRE, 1982, R. 31—04.
4. Special design reduces environmental impact of the 400 kV Berlin line./G. Elstner, H. Patrunsky, G. Schinsoge e. a. — CIGRE, 1982, R. 22—04.
5. Sandler R., Brinkmann J., Kühne B. Laboratory studies on animals and human beings exposed to 50Hz electric and magnetic fields. — CIGRE, 1982, R. 36—01.
6. Havard D. C., Paulson A. S., Pohlman J. C. The economic benefits of controls for conductor galloping. — CIGRE, 1982, R. 22—02.
7. WG 23.03. The state of international development and experience with SF₆ gas — insulated high voltage switchgear.— CIGRE, 1982, R. 23—01.
8. Development of superconducting synchronous machines in Japan/H. Kaminosono, M. Iwamoto, H. Fujino e. a. — CIGRE, 1982, R. 11—02.
9. Superconducting turbogenerators current situation and prospects/I. A. Glebov, L. I. Chubraeva, I. S. Edmonds e. a. — CIGRE, 1982, R. 11—14.
10. An advanced 700 MVA turbine generator in its own independent test field for permanent testing and development — a new way to improve consistently turbine generator capability, economy and reliability/D. Lambrecht, H. Duffert, M. Liese e. a. — CIGRE, 1982, R. 11—03.

ГЛЕБОВ И. А., акад., ТИХОДЕЕВ Н. Н., чл.-корр. АН СССР



Указатель материалов, помещенных в журнале «Электричество» в 1983 г.

Автор и название статьи	№ жур-нала	Стр.
Теоретическая электротехника		
Мустафа Г. М. — Метод интегральных уравнений для отыскания периодических режимов цепей с ключами	1	43
Губарев Г. Г., Северин В. П. — Оптимизация параметров импульсных источников питания	1	64
Савин А. Г. — Векторное представление токов и напряжений при анализе цепей с вентилями преобразователями	1	70
Бендик Н. Т., Комиссаржевский Н. Е. — Метод исследования критического тока длинномерных образцов токнесущей системы сверхпроводящего кабеля	2	35
Бельман М. Х. — Расчет переходного процесса в нелинейной цепи при импульсном питании	2	45
Мейер А. А., Поляков А. В. — Расчет распределения потенциала по поверхности печатных проводников	2	55

Автор и название статьи	№ жур-нала	Стр.
Голощапов С. С., Озеров Л. А. — Расчет внутреннего сопротивления электрохимических аккумуляторов на высоких частотах	2	57
Корнеев В. В., Трухин В. А. — Особенности вывода энергии из секционированного соленоидального индуктивного накопителя в схеме с умножением тока	3	54
Кленов Г. Э., Ляхова Н. В., Поляков А. В. — Влияние околоанодных экранов на распределение потенциала при электрохимической защите металлов от коррозии	3	74
Генералов А. П. — Колебательный процесс в цепи, состоящей из конденсатора и двух отрезков линий	4	38
Икрянников В. А. — Анализ разряда конденсатора в контуре с нелинейной диссипацией энергии	4	60
Карпенко Л. Н., Скорняков В. А. — Распределение плотности тока в цилиндрических контактах	4	63

Автор и название статьи	№ жур-нала	Стр.
-------------------------	------------	------

Мелешкин В. Н. — Матричное преобразование уравнений состояния и эквивалентные схемы линейных цепей	5	29
Курганов С. А., Филаретов В. В. — Метод многовариантного анализа нелинейных электронных схем	5	42
Юдин В. В. — Об эквивалентном преобразовании сложной магнитной цепи с контурами электрической связи	5	46
Князь А. И., Драганов В. М. — О расчете электростатических полей в кусочно-однородных средах	5	55
Чалисов Ю. И., Додзина Т. Я. — Экспериментальный анализ внешнего магнитного поля электротехнических устройств	6	49
Стеблев Ю. И. — Условия минимальных потерь в теории поверхностного эффекта	6	62
Толмачев С. Т. — Эффективные параметры упорядоченных гетерогенных сред	7	35
Бондаренко А. В. Общая теорема реализации активных РС-схем	7	63
Ивлиев Е. А., Иоссель Ю. Я. — К расчету электрической емкости методом площадок	7	65
Намитокоев К. К., Пахомов П. Л. — Применение вариационного принципа к расчету цепей переменного тока с газоразрядными элементами	8	27
Ионов А. Г., Лаптев А. А., Чернышов С. К. — Расчет параметров передачи коаксиальных кабелей с трубчатых проводниками в широком диапазоне частот	8	71
Константинеску И. Н. — Применение теории распределений к анализу электрических цепей	9	41
Глузман П. Л., Дворсон А. И. — Комплексные коэффициенты передачи управляемой магнитной цепи	9	44
Иоссель Ю. Я., Кленов Г. Э. — Расчет стационарного электрического поля точечных источников тока с плоскими экранами	9	47
Новиков В. Н. — Решение задач электростатики численными методами	9	52
Туркия Н. Г., Готуа Т. К. — Методика расчета матрицы собственных и взаимных проводимостей ветвей электрических цепей	9	54
Лебедев Ю. В. — Уточнение расчета устойчивости дискретных автоматических систем регулирования	9	57
Ким Ги-шен — Об аналитическом методе исследования переходных процессов в нелинейных электрических цепях	10	39
Асташевская Т. С. — К использованию матриц при анализе электромагнитных устройств переменного тока с ферромагнитными сердечниками	10	63
Коляда Ю. В. — Процесс вычислений при численном интегрировании уравнений динамики электрических цепей	10	72
Мейер А. А. — Искажение поля точечного источника тока на бесконечной проводящей плоскости, вызванное круглой инородной областью	10	74
Лавров Г. Н., Тарасов В. П. — Устройство гальванического разделения измерительных электрических цепей переменного тока	11	66
Карепов А. Г., Бокарев Г. Т. — Метод определения эквивалентного сопротивления структурно-сложных электрических схем	11	68
Шоффа В. Н. — Расчет разомкнутых мостовых магнитных систем	11	70
Штибен Г. А. — Компенсация активного сопротивления в поперечном звене фильтра	11	74
Амромин Э. Л., Новгородцев А. Б. — Определение формы электродов конденсатора с постоянной напряженностью на краевых участках	12	31
Нетушил А. В., Ермуратский П. В. — Распределенные параметры конденсаторов	12	35
Анфиногентов О. Н., Беспалов В. Я., Мощинский Ю. А. — Расчет электромагнитного поля в стальной пластине с учетом вихревых токов	12	59

Электротехнические материалы

Абасов С. А., Курбанов М. А., Велиев Т. М., Кулиев М. М. — Влияние сильного электрического поля на механическую долговечность полиэтилена	1	55
Юдин В. В. — Исследование энергоемкости ферромагнитных сердечников	1	57
Соболев В. Г. — Механизм поверхностной проводимости твердых диэлектриков	5	51

Автор и название статьи	№ жур-нала	Стр.
-------------------------	------------	------

Овсянников Б. Д. — Метод контроля изоляции в сериях электролизеров	9	20
Шумилов Ю. Н., Храмов Л. Ф., Покровский С. Ф. — Разрушение изоляционных стекол поверхностными частичными разрядами	10	66
Голован Э. В., Рубан Н. С., Терещенко Т. Б. — Исследование магнитоупругой чувствительности ряда прецизионных сплавов	10	70
Месенжик Я. З., Прут Л. Я., Карташов Б. Г. — Надежность изоляции погружных электродвигателей	11	64
Электроэнергетика и ТВН		
Прусс В. Л., Смирнов А. И. — Управление линией распределительной сети в аварийном режиме	1	12
Веников В. А., Глазунов А. А., Тюханов Ю. М. — Математические модели формирования оптимальных схем электроснабжения при автоматизированном проектировании	1	17
Фокин Ю. А. — Схема распределения электроэнергии на напряжении 10/0,38 кВ в городах с многоэтажной застройкой	1	22
Забелло Е. П., Кондратьев М. П. — Однофазные замыкания на землю в воздушных линиях электропередачи 10 кВ на железобетонных опорах	1	51
Вакорин А. А., Ртищев В. М., Рыбин В. Н. — Устройства защиты от волновых перенапряжений в емкостных генераторах импульсных токов	1	54
Майборода Г. А., Скрыль В. Ф. — О повышении эффективности работы устройств телеизмерения энергосистем	1	59
Жежеленко И. В., Никифорова В. Н. — Изменения стандарта на качество электроэнергии	1	61
Баринев В. А., Совалов С. А. — Анализ статической устойчивости электроэнергетических систем по собственным значениям матриц	2	8
Веников В. А., Строев В. А., Штробель В. А., Богданова Д. А., Гремяков А. А., Калинин С. Д., Шульженко С. В. — Исследование моделирующего комплекса для разработки цифрового АРВ	2	15
Глазунов А. А., Кузнецова Т. А., Федосеев А. А. — Экономически целесообразные напряжения и мощности глубоких вводов в города	2	20
Арцишевский Я. Л., Казанский В. Е. — Особенности релейной защиты с дискретными трансформаторами тока и напряжения	2	26
Либержон Э. М. — Защита от замыканий на землю линий электропередачи 110—220 кВ	2	50
Резницкий А. И., Бордюгов В. М., Штильман Б. М. — Метод планирования ремонтов оборудования электростанций	2	58
Фархи С. Л., Вичев С. Т., Тагаров К. Д. — Анализ переходных процессов в цепях с трансформаторами тока	2	61
Кузнецов В. Г. — Компенсация реактивной мощности в электрических сетях с несимметричными нагрузками	2	64
Лачугин В. Ф., Попов И. Н., Соколова Г. В., Зейналов А. Д. — Исследование волновых процессов для релейной защиты линий сверхвысокого напряжения	3	1
Смирнов К. А. — Условия возникновения самораскачивания в энергосистемах	3	8
Рабинович Р. С., Полонская М. А. — Модели тепловых электростанций для расчета длительных электро-механических переходных процессов в энергосистемах	3	11
Новиков В. В., Кривенцев В. И., Дроздов В. В. — Оптимальное размещение оборудования в автономной электроэнергетической системе	3	19
Решетов С. А. — Оптимизация сечений проводов и размещения узлов разветвленной электрической сети	3	23
Будзко И. А., Левин М. С., Блохина Е. Л. — Выбор параметров электрических сетей сельских населенных пунктов	3	27
Желтов К. А. — Стабилизация высокого напряжения в схемах с импульсными трансформаторами	3	44
Засыпкин А. С., Рогачевский В. И. — О применении дифференциально-фазного принципа для релейной защиты автотрансформатора	3	48
Авруцкий В. А., Неймарк Г. В. — Постлежитримерная стадия разряда в неоднородном поле	3	56
Денисенко Н. А., Гоффманн И. — Стохастическая модель выбора элементов систем электроснабжения	3	59

Литкенс И. В., Федотова Н. В., Хачатурова Е. А. — Упрощения элементов энергосистемы при анализе статической устойчивости с учетом самораскачивания

3 62

Волконский В. А., Кузовкин А. И. — О тарифах на электроэнергию с точки зрения теории оптимального планирования

3 64

Казанцев В. Н., Бердин А. С., Мухачев А. И., Шамапов А. П. — Определение потерь энергии в замкнутых сетях энергосистем в условиях неполноты информации

3 67

Астахов Ю. Н., Веников В. А., Иванов А. М., Лидоренко Н. С., Мучник Г. Ф., Тер-Газарян А. Г., Харитонов В. Ф. — Функциональные возможности накопителей электрической энергии в энергосистемах

4 1

Оруджев Ф. Д. — Экспертные оценки и теория нечетких множеств в исследовании электрических систем

4 7

Ершевич В. В., Кривушкин Л. Ф. — Некоторые итоги освоения электропередач 750 кВ

4 12

Давыдов В. Е., Ефремов И. А., Левинштейн М. Л., Лысков Ю. И., Подъячев В. Н., Тугулев В. Н. — Управление коммутациями при глубоком ограничении перенапряжений

4 14

Кудрявцев Е. П. — Расчет электродинамической стойкости гибких шин

4 19

Шумилов Ю. Н., Аксенов В. А. — Электрофизические процессы в поверхностном слое при перекрытии загрязненных изоляторов

4 22

Молиш З. — Приоритеты реализации функций в автоматизированных системах диспетчерского управления

4 50

Кузнецов А. П., Селывахин А. И. — Определение участков и опор с поврежденной изоляцией на воздушных линиях 110 кВ и выше

4 53

Макоклюев Б. И., Воронков В. Н., Логинова Л. В. — Эффективность введения «летнего времени» для Московской энергосистемы

4 55

Матвеев В. Ф. Уточнение телеграфных уравнений для расчета электромагнитной связи между непараллельными воздушными линиями

4 58

Арзамасцев Д. А., Игуменцев В. А., Саламатов И. А., Коваленко Ю. П. — Расчет нестационарного режима в системе электроснабжения с резкопеременными нагрузками

5 1

Шидловский А. К., Кузнецов В. Г. — Пофазная коррекция токов в сети с нулевым проводом при случайном характере их изменения

5 5

Мозырский В. И. — Распространение токов при однофазном коротком замыкании в распрестроустройстве высокого напряжения

5 38

Богданов В. А. — Выбор параметров системы сбора телеинформации

5 48

Красников В. И., Сагутдинов Р. Ш. — Расчет симметричных составляющих напряжения при разрыве одной фазы в сети 0,38 кВ

5 49

Гельфанд Я. С. — Анализ чувствительности направленных фильтровых высокочастотных защит

6 1

Якобс А. И., Шаматава В. Д. — Оценка эффективности устройств защитного отключения

6 6

Кузнецов В. Г. — Метод определения областей применения схем симметрирующих устройств

6 12

Ледовский А. Н. — Проектирование кинетических аккумуляторов электрической энергии

6 31

Кузьмичева Е. В., Околович М. И. — Автоматизированное проектирование электрических схем распределительных устройств блочных электростанций

6 42

Бабинов М. В., Базелян Э. М. — Перенапряжения во внутренних цепях объекта при распределении тока молнии по его обшивке

6 44

Герман Л. А. — О выборе числа ступеней регулируемых установок поперечной емкостной компенсации тяговых нагрузок

6 46

Амирикан Р. А., Шарабханян И. И. — Расчет режимов сложных систем методом деления на подсистемы

6 54

Идельчик В. И. — Пример анализа существования и единственности решения уравнений установившегося режима

6 56

Абрамян Е. А., Альтеркоп Б. А., Кулешов Г. Д. — Передача энергии электронным пучком: проблемы и перспективы

7 1

Гусейнов Ф. Г., Рахманов Н. Р. — Оперативная статистическая идентификация объектов электроэнергетической системы

7 6

Довганюк И. Я., Забровский С. Г., Кабанов П. С., Лазарев Г. Б., Мамиконянц Л. Г., Толстов Ю. Г., Шакарян Ю. Г. — Вопросы создания и применения мощных регулируемых электроприводов механизмов собственных нужд электростанций

7 10

Веников В. А., Щербина Ю. В., Лепорский В. Д. — Распределенные системы оперативного управления электропотреблением

7 14

Меерович Э. А., Чальян К. М., Букздорф Н. В. — Оптимизация схем соединения экранов токопроводов с токоограничивающими реакторами

7 17

Туманов И. М., Севастьянов В. В., Рогачевский В. Г. — Компенсация реактивной мощности и симметрирование нагрузок тяговых трансформаторов

7 20

Ларионов В. П., Тарасов Т. Н. — Высокочастотный коронный разряд и его влияние на электрическую прочность воздушных промежутков

7 41

Решидов И. К., Зеликов Д. Л., Кузьминский А. С. — Применение коронного разряда для измерения концентрации частиц в дымовых газах

7 43

Сурвило И. К. — Сопоставление схем расщепления и пассивных фильтров измерительных органов

7 48

Орел О. А. — Зависимость потерь активной мощности в синхронных машинах от их реактивной нагрузки

7 50

Жежеленко И. В., Степанов В. П., Быховская О. В. — Вероятностное моделирование расчетных электрических нагрузок промышленных установок

7 52

Федоров А. А., Садчиков С. В. — Определение параметров системы электроснабжения промышленного предприятия

8 1

Хачатрян В. С., Темурджян А. В. — Оптимизация структуры объединенной электроэнергетической системы с применением метода декомпозиции

8 8

Мадаш-Доблер М., Пинц Г. — Программируемые устройства телемеханики энергосистем

8 13

Шафир Ю. Н., Рогачевский В. И. — Методы расчета распределения тока в обмотках трансформаторов и реакторов

8 18

Шварц З. Л., Мирзабекян Г. З., Нагорный В. В., Гринштейн Б. И. — Система питания электрофильтров и особенности процессов осаждения в поле импульсной короны

8 24

Липский А. М. — Взаимосвязь показателей качества электроэнергии в сетях с резкопеременными нагрузками

8 50

Михайлов В. В., Шумский А. Л., Ткаченко Г. И. — Дифференциально-фазная защита с магнитодиэлектрическими преобразователями тока для автономных электроустановок

8 52

Лохов С. П. — Расчет колебаний напряжения сети

8 54

Колонский Т. В. — Повышение адаптации противояварийного управления в энергосистемах

9 1

Смирнов К. А. — О статической устойчивости энергосистем, содержащих нагрузочные узлы

9 5

Фокин Ю. А., Пономаренко И. С., Павликов В. С. — Экспериментальное исследование вероятностно-статистических характеристик нагрузок в электроснабжающей системе

9 9

Резников С. Б. — Автономные системы электроснабжения с однопроводным распределением переменного тока стабильной частоты

9 15

Беляков Ю. С., Москалева Р. П. — Взаимоиндукция линий при расчете токов в электрических сетях

9 39

Манусов В. З., Могирев В. В., Шепилов О. Н. — Исследование режимов ЕЭС СССР с учетом случайного характера исходной информации

10 1

Кривенцев В. И. — Оптимизация степени избыточности элементов в автономных системах распределения электрической энергии транспортных средств

10 6

Автор и название статьи	№ жур-нала	Стр.	Автор и название статьи	№ жур-нала	Стр.
Иванов Е. А., Дудник В. Д., Китаенко Г. И. — Особенности функционирования устройств контроля и защиты в сетях переменного тока, связанных с цепями постоянного тока	10	11	Киселев П. В., Ходжаев К. Ш. — Уравнение нестационарных процессов синхронного генератора, питающего нагрузку через выпрямитель	4	33
Арион В. Д. — Комплексный расчет параметров элементов распределительных сетей при автоматизированном проектировании	10	18	Зечихин Б. С., Старовойтова Н. П. — Гармонический анализ активных зон генераторов с редкоземельными постоянными магнитами	4	43
Сибаров Ю. Г., Сколотнев Н. Н., Лаптев А. Ф., Копаев В. Н., Табак В. Я., Богушевич М. С. — Пороговые фибрилляционные токи	10	23	Урусов И. Д. — Моделирование колебательных процессов в валопроводе турбоагрегата	5	8
Белан В. Г., Иванов И. А., Лотоцкий А. П. — Особенности разряда индуктивного накопителя на катушку с лайнером	10	26	Костелянец В. С. — Исследование асинхронных режимов мощных гидрогенераторов	5	11
Смирнов С. В., Резников С. Б., Бочаров В. В. — Снижение колебаний напряжения в автономных электроэнергетических системах	10	43	Инкин А. И. — Расчет вихревого и потенциально-магнитных полей в явнополюсных электрических машинах	5	15
Саухатас А.-С. С., [Фабрикант В. Л.], Шабанов В. А. — Многофазные реле сопротивления и их сопоставление методом статистических испытаний	10	45	Афанасьев А. А. — Статическая устойчивость вентильной машины	6	21
Сумин А. Р. — Расчет индуктированного напряжения в однопроводной линии, проложенной между железнодорожными путями	10	49	Мещенина М. П., Пашкевич В. И., Фетисов В. В. — Оценка демпфирующих свойств обмотки якоря машины постоянного тока при коммутации	6	25
Соколов Н. И., Каспаров Э. А. — Режимы работы и устойчивость турбогенераторов с поперечной управляющей обмоткой на роторе	11	7	Готовцев Н. П., Федосов М. И. — Методика расчета электромагнитных усилий в индукторе криогенной униполярной машины	6	59
Лисеев М. С., Вашурина А. В., Скопинцев В. А., Нажимутдинов М., Шарофидинов Х. Х. — Метод расчета послеаварийных режимов электроэнергетических систем	11	18	Ильин Г. П. — Решение полевой задачи для экранированной магнитной муфты	6	68
Решетов С. А. — К оптимизации сечений проводов и координат размещения элементов системы электро-снабжения	11	23	Попов П. Г., Шумилов Ю. А. — Расчет пусковых параметров асинхронного двигателя с прямыми пазами	7	54
Рябкова Е. Я. — Исследование импульсных характеристик заземлителей по опытным данным	11	46	Гумановский Б. Я., Самулев В. И., Бурда Е. М. — Особенности статических режимов машин двойного питания малой мощности	8	45
Бушуев В. В. — Применение цифро-анало-гического комплекса для исследования динамических режимов и устойчивости электроэнергетических систем	12	1	Коняев А. Ю., Проскуряков В. С., Резин М. Г., Сарапулов Ф. Н. — Особенности расчета характеристик линейного асинхронного двигателя с массивным магнитопроводом	8	65
Шуин В. А. — Влияние разряда емкости поврежденной фазы на переходный процесс при замыканиях на землю в кабельных сетях 3—10 кВ	12	4	Игнатов В. А., Забора И. Г., Ставинский А. А. — Использование активного объема и расчет намагничивающего тока торцевых асинхронных машин	8	68
Беляков Н. Н., Рашкес В. С., Хоецян К. В., Шерер Г. Н., Шперлинг Б. Р., Чедвик Дж. У. — Советско-американские исследования однофазного АПВ в электропередачах 750—765 кВ с четырехлучевыми реакторами	12	9	Гольмаков Ю. И., Новиков Н. Н., Шутько В. Ф. — Энергетический критерий синхронизации синхронного двигателя при асинхронном пуске	9	24
Жежеленко И. В., Шиманский О. Б. — Электромагнитные помехи в системах электроснабжения промышленных предприятий	12	14	Бут Д. А., Куликов Н. И. — Электродвигатели с упругим креплением ротора	9	29
Губарев Г. Г., Конотоп В. В. — Синтез параметров генератора импульсов напряжения	12	50	Резниченко В. Ю., Курилин С. П. — Особенности дифференциальных уравнений несимметричных электрических машин переменного тока	9	50
Соколова М. В. — Характеристика разряда в воздушном промежутке с электродом, покрытым твердым диэлектриком	12	53	Галкин В. И., Лихошвай И. П. — Исследование магнитных опор с зубчатым строением активных поверхностей	10	55
Лисеев М. С., Шульженко С. В. — Расчеты установившихся режимов энергосистемы с помощью тренажера	12	56	Мотовилов Н. В., Костырев М. Л. — Вентильное возбуждение асинхронных генераторов с короткозамкнутым ротором	10	58
Шашурин А. К., Петропавловский А. Ю. — Способ расчета параметров пассивной электрической цепи заданной структуры	12	61	Глебов И. А., Данилевич Я. Б., Мамиконянц Л. Г., Хуторецкий Г. М. — Учет аномальных режимов при конструировании и эксплуатации мощных турбогенераторов	11	13
Электрические машины и трансформаторы			Хуторецкий Г. М., Косачевский В. И. — Тепловые ограничения при работе мощных турбогенераторов в асинхронном режиме	11	50
Богаченко И. Н., Бойчук М. В. — Нестационарные температурные поля асинхронных машин с несимметричной статорной обмоткой	1	33	Загрядцкий В. И. — Электромагнитная совместимость в совмещенных электрических машинах и устройствах	11	57
Клепка П. К. — Сравнение некоторых способов расчета электромагнитного поля электрических машин	1	65	Йондем А. И., Никиян Н. Г. — Уточнение схемы замещения и круговой диаграммы трехфазной асинхронной машины малой мощности	11	59
Ильин Г. П., Карасев А. В. — Расчет магнитного поля и электромагнитных сил синхронных магнитных муфт	1	67	Хуторецкий Г. М., Варшавский В. Д., Праздников В. И. — Выбор размеров седлообразной сверхпроводниковой обмотки возбуждения турбогенератора	12	46
Иванов-Смоленский А. В., Власов А. И., Кузнецов В. А., Мартынов В. А. — Расчет дифференциального рассеяния обмотки якоря явнополюсной синхронной машины	3	31	Ананянц С. С., Гущин Е. В., Пинский Г. Б., Шамин В. Г. — О смещении напряжения нейтрали в обмотках машин переменного тока	12	48
Владимирский С. А., Наседкина А. Я., Филиппов И. Ф. — Развитие систем вентиляции крупных гидрогенераторов	3	39	Преобразовательная техника		
Данько В. Г., Янтовский А. И., Мирошниченко А. Г., Берзин Е. К. — Электродинамические переходные процессы в сверхпроводящей магнитной системе электрической машины	3	69	Гринштейн Б. И., Жмуров В. П., Безуглый С. Л., Сидорский М. А. — Анализ электромагнитных процессов в высоковольтном тиристорном преобразователе при коммутации тока в вентилях	1	37
			Носик Л. П., Ступель А. И., Цфасман Г. М. — Обеспечение надежности системы регулирования выпрямительно-инверторной подстанции	2	31
			Вадачкория Г. В. — Оптимальное проектирование двухэлементных параметрических источников тока	2	40
			Миронов В. Н., Обухов С. Г. — Процедуры тестового диагноза вентильных преобразователей	2	53

Мыцк Г. С., Шевякова Н. Б. — Аппроксимация моногармонического сигнала по минимуму искажений	2	70
Кобзев А. В., Лебедев Ю. М., Сидонский И. Б. — Применение одной модификации метода коммутационных функций для анализа ключевых схем преобразовательной техники	4	27
Игнатов В. Е., Кузьмин А. В., Скобарихин Ю. В. — Экспериментальная модель сверхпроводящего преобразователя на ток 1000 А	4	56
Булатов О. Г., Одынь С. В., Шевченко А. Г. — Расчет узлов коммутации комбинированно выключаемых тиристоров	4	66
Исхаков А. С. — Выбор дискретных переменных при анализе устойчивости выпрямителей	4	69
Жемеров Г. Г., Коваленко И. Т. — Внешние характеристики выпрямителя с поочередным регулированием	5	19
Вадачкория Г. В. — Анализ стабилизирующих свойств параметрических источников тока	5	25
Локарев В. И. — Исследование резонансно-параметрического измерительного преобразователя сдвига фаз	5	44
Цфасман Г. М. — О применении метода D-разбиения при анализе устойчивости регулируемых вентильных преобразователей	6	37
Григорян М. О., Позин М. Б. — Фазовые зависимости в регулируемом ступенчато-синусоидальном напряжении	6	72
Денисов А. И., Сигарев Н. Н. — Области перспективного применения ортогональных функций Уолша в преобразовательной технике	7	25
Булатов О. Г., Лабунцов В. А., Одынь С. В. — Способы и устройства выключения тиристоров	7	30
Шипилло В. П., Зезюлькин Г. Г. — Импульсная модель многофазного вентильного преобразователя	7	59
Львов Е. Л., Розанов Ю. К. — Стационарные режимы преобразователя постоянного тока с широтно-импульсной модуляцией	8	41
Зезюлькин Г. Г., Пищиков В. И., Чугуев Ю. М. — Импульсная модель зависимого параллельного инвертора тока	8	74
Антонов Б. М., Случанко Е. И. — Методика исследования переходных процессов в регулируемой вентильной системе нагружения МГД-генератора	10	30
Староверов Г. М. — Влияние вида схемы многофазных выпрямителей на размер обмоток питающих трансформаторов	10	60
Беркович Е. И. — Анализ вентильных преобразователей с применением модуль-функций	12	21
Остреров В. М. — Определение оптимальных параметров коммутирующих контуров устройств принудительного выключения тиристоров	12	27
Электрические аппараты		
Долинский Ю. М. — Математическая модель для расчета устойчивости электрических контактов при протекании сквозных токов	1	29
Воскресенский А. А., Червяков Л. Н. — О параметрах схемы замещения трансформаторов тока при прямоугольной аппроксимации характеристики намагничивания	1	50
Намитокоев К. К., Брезинский В. Г., Юрченко С. М. — К расчету нестационарного температурного поля катушки электромагнита	3	49
Карпенко Л. Н., Скорняков В. А., Сурина Г. А. — Расчет нагрева замкнутых контактов с учетом поверхностного эффекта	6	16
Кухтиков В. А., Шлейфман И. Л. — Предварительный пробой в выключателях высокого напряжения	7	45
Крижанский С. М. — Критерии подобия физического моделирования процессов дугогашения в камерах продольного дутья	8	33
Долинский Ю. М. — Расчет износа электрических контактов под воздействием сильнооточной дуги	8	37
Яламова Е. Т. — Влияние материала дугогасительной камеры на характеристики дуги в малообъемных масляных выключателях	12	40
Андрюханов В. В., Копылов С. И. — Определение параметров сверхпроводниковых катушек с параллельным соединением секций	12	43

Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических процессов		
Казанский В. М., Сабинин Ю. А., Малинин Л. И., Петров Б. А. — Анализ требований к электромеханическим модулям постоянного тока промышленных роботов	1	1
Кожевников К. И. — Выбор оптимальной по нагреву диаграммы тока якоря двигателя постоянного тока	2	67
Козырев С. К. — Исследование переходных процессов в электроприводе постоянного тока при изменении магнитного потока двигателя	5	34
Жиликов В. И. — К анализу оптимальных управлений на особых участках движения двухмассовой электромеханической системы	7	57
Шаров С. Н., Зонис Е. М., Зонис Ю. М. — Исследование динамики электропривода с учетом люфта и сухого трения	7	68
Филатов А. С., Дралюк Б. Н., Валдырев А. С. — Ограничение координат в электроприводах согласованно управляемых механизмов	8	57
Богаченко И. Н., Бурлаков М. В. — Контроль электрического и технологического оборудования прокатных станов	8	60
Панасюк В. И. — Оптимальное управление электроприводом при одновременном воздействии на ток и поток двигателя	9	35
Свечарник Д. В., Никифоров Б. Д. — Особенности линейного электропривода транспортного и промышленного назначения	10	34
Высочанский В. С. — Ведомый инвертор с квазисинусоидальной стабильной кривой напряжения	10	52
Машинян Л. Х., Соколова Е. М. — Метод исследования системы тиристорный регулятор напряжения — асинхронный двигатель с учетом электромагнитных процессов	11	40
Герасимьяк Г. П. — Передаточная функция асинхронного двигателя при параметрическом управлении	11	53
Илюхин А. И. — Повторно-кратковременный режим работы электропривода и оптимальные передаточные числа редуктора	11	61
Электрификация транспорта		
Нагорский В. Д., Малахов В. И., Гольдштейн И. А. — Оптимизация электродинамического подвеса высокоскоростного наземного транспорта	3	71
Косарев Б. И., Косолапов Г. Н., Кушнир А. И. — Расчет и нормирование допустимых напряжений на заземленных элементах устройств железнодорожного электроснабжения	11	28
Исаев И. П., Козлов Л. Г., Матвеевичев А. П. — Прогнозирование надежности тяговых электродвигателей по результатам ускоренных испытаний головных образцов	11	34
Электротехнология, электротермия, электросварка		
Игнатов И. И., Ханисон А. В. — Расчет электрических параметров и режимов дуговых сталеплавильных печей	8	62
Донской А. В. — Электротехнология в народном хозяйстве СССР	12	18
Дискуссии		
Смирнова Э. П. — Ответ автора (по статье Э. П. Смирнова, «Электричество», 1978, № 8)	2	75
Тюханов Ю. М., Усехин В. Н.; Артемьев А. А., Артемьев А. И.; Ставровский А. Н.; Идельчик В. И., Акишин Л. А., Паламарчук С. И. — по статье В. А. Веникова («Электричество», 1982, № 4)	4	71
Молодцов В. С.; Журавлев В. Г., Арион В. Д.; Тайц А. А., Приклонский Е. Н.; Керимов А. М., Гурфинкель Е. Б.; Тарикулиев И. Я.; Мамедьяров О. С.; Пархаданов М. М.; Ответ автора — по статье Ю. С. Железко («Электричество», 1981, № 10)	5	58
Зихерман М. Х.; Карасев В. В., Лейтес Л. В.; Гельфанд Я. С.; Казанский В. Е.; Сирота И. М.; Бору Н. В., Руденко В. И.; От редакции — по статьям Строганова Б. Г. и др. («Электричество», 1980, № 3) и Мееровича Э. А. и др. («Электричество», 1981, № 8)	9	60
Синьчугов Ф. И. — Об основных положениях расчета надежности электроэнергетических систем (Ответ автора)	11	76

Автор и название статьи	№ жур-нала	Стр.
-------------------------	------------	------

Библиография

Капустина А. Г., Польгина Т. Л., Митькин Ю. А. — рецензия на книгу В. П. Ларионова и др. «Техника высоких напряжений. Учебник для техникумов»	4	74
Журавлев В. Г. — Три книги о повышении качества и эффективности работы энергосистем	4	75
Каганов З. Г., Белый М. И. — рецензия на книгу Е. С. Кухаркина «Инженерная электрофизика. Техническая электродинамика»	5	73
Бондалетов В. Н., Волков Н. Б. — рецензия на книгу Г. А. Шнеерсона «Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов»	5	74
Каганов З. Г., Гусейнова Т. И. — рецензия на книгу К. М. Поливанова «Электродинамика движущихся тел»	6	74
Чальян К. М. — рецензия на книгу С. М. Аполлонского «Расчет электромагнитных экранирующих оболочек»	9	71
Хроника		
Комаров Д. Т. Всесоюзное научно-техническое совещание «Повышение надежности электроснабжения сельского хозяйства»	2	77
Поливанов К. М. — 75 лет Московскому обществу русских электротехников	3	78
Имянитов И. М., Халилов Ф. Х. — II Всесоюзный симпозиум по атмосферному электричеству	4	76
Альтшулер Э. Б., Богатенков И. М., Халилов Ф. Х. — Теоретические и электрофизические проблемы расщепления токов в мощных заземляющих устройствах в многолетнемерзлых грунтах районов Крайнего Севера (заседание секции IV Научного совета АН СССР)	5	75
Тамкиви П. И. — Второе научно-техническое совещание «Проблемы электромагнитной совместимости силовых полупроводниковых преобразователей»	5	76
Куликов С. Н. — Всесоюзное научно-техническое совещание «Проблемы управления промышленными электромеханическими системами»	6	75
Голоднова О. С., Езовит Г. П. — Всесоюзное совещание «Разработка, создание и внедрение системы технической диагностики турбо- и гидрогенераторов	7	75
Ковалев Б. И., Ражанский И. М., Халилов Ф. Х. — Всесоюзный научно-технический семинар «Численные методы расчета электромагнитных переходных процессов в электрических системах и электростатических полей в высоковольтных конструкциях»	7	76
Глебов И. А., Вершинин Ю. Н., Фиалков В. М. — Сверхпроводимость в электроэнергетике и электротехнике	9	72
Лукашов Э. С., Князева О. А. — Всесоюзное научно-техническое совещание «Исследование длительных переходных процессов энергосистем»	9	75
Исмаилов З. И. — VI Всесоюзная межвузовская конференция по теории и методам расчета нелинейных цепей и систем	9	70
Грудинский П. Г., Фаерман А. Л. — 100-летие Правил устройства электротехнических установок	12	64

Автор и название статьи	№ жур-нала	Стр.
-------------------------	------------	------

Глебов И. А., Тиходеев Н. Н. — Некоторые достижения и проблемы техники передачи электрической энергии и конструирования крупных генераторов	12	67
Указатель материалов, помещенных в журнале «Электричество» в 1983 г.	12	70
Подготовка рукописей для журнала «Электричество»	12	78
Юбилей		
Соломон Абрамович Совалов (К 75-летию со дня рождения)	1	74
Лев Вениаминович Цукерник (К 75-летию со дня рождения)	1	75
Михаил Владимирович Костенко (К 70-летию со дня рождения)	1	75
Юрий Георгиевич Толстов (К 70-летию со дня рождения)	1	76
Моисей Соломонович Левин (К 60-летию со дня рождения)	1	77
Николай Иванович Соколов (К 75-летию со дня рождения)	2	78
Владимир Степанович Комельков (К 70-летию со дня рождения)	3	77
Владимир Петрович Ларионов (К 60-летию со дня рождения)	4	78
Григорий Грантович Гимоян (К 60-летию со дня рождения)	4	78
Академик Б. М. Вул (К 80-летию со дня рождения)	5	78
Чингиз Мехтиевич Джуварлы (К 70-летию со дня рождения)	6	76
Федор Михайлович Юферов (К 60-летию со дня рождения)	6	76
Павел Давидович Давидов (К 60-летию со дня рождения)	6	77
Владимир Дмитриевич Барышников (К 70-летию со дня рождения)	7	77
Игорь Мойсеевич Сирота (К 75-летию со дня рождения)	9	78
Павел Михайлович Тихомиров (К 75-летию со дня рождения)	10	76
Юрий Гевондович Шакарян (К 50-летию со дня рождения)	10	76
Сергей Владимирович Страхов (К 75-летию со дня рождения)	11	78
Владимир Васильевич Пасынков (К 75-летию со дня рождения)	11	77
Некрологи		
Вукол Михайлович Лавров	1	78
Иван Тихонович Жердев	3	78
Андрей Георгиевич Захарин	6	78
Разные статьи и информация		
Развитие электротехники и энергетики в советских социалистических республиках	1	1
Гроднев И. И., [Лавров В. М.] — Развитие волоконно-оптических систем передачи информации	1	4
Читательская конференция журнала «Электричество»	2	76
Веников В. А., Шнейберг Я. А. — От истоков электропередачи к прогнозам на будущее	11	1



Редакция журнала «Электричество» с глубоким прискорбием сообщает о кончине выдающегося чехословацкого ученого в области теоретической и экспериментальной электротехники, электрофизики и измерительной техники, доктора технических наук, профессора Словацкого политехнического института в Братиславе академика Людовита Кнеппо и выражает соболезнование семье, друзьям и коллегам покойного.

Алфавитный указатель авторов статей

А

Абасов С. А. 1, 55
Абрамян Е. А. 7, 1
Авруцкий В. А. 3, 56
Акишин Л. А. 4, 73
Аксенов В. А., 4, 22
Альтеркоп Б. А. 7, 1
Альтшулер Э. Б. 5, 75
Амирикан Р. А. 6, 54
Амромин Э. Л. 12, 31
Ананянц С. С. 12, 48
Андрянов В. В. 12, 43
Антонов Б. М., 10, 30
Анфиногентов О. Н. 12, 59
Арзамасцев Д. А., 5, 1
Арион В. Д. 5, 59; 10, 18
Артемов А. А. 4, 72
Артемов А. И. 4, 72
Арцишевский Я. Л. 2, 26
Астахов Ю. Н. 4, 1
Асташевская Т. С. 10, 63
Афанасьев А. А. 6, 21

Б

Бабинов М. В. 6, 44
Базелян Э. М. 6, 44
Барин В. А. 2, 8
Безуглый С. Л. 1, 37
Белан В. Г. 10, 26
Бельман М. Х. 2, 45
Белый М. И. 5, 73
Беляков Н. Н. 12, 9
Беляков Ю. С. 9, 39
Бендик Н. Т. 2, 35
Бердин А. С. 3, 67
Берзин Е. К., 3, 69
Беркович Е. И. 12, 21
Беспалов В. Я. 12, 59
Блохина Е. Л. 3, 27
Бобаенко И. Н. 1, 33; 8, 60
Богатенков И. М. 5, 75
Богданов В. А. 5, 48
Богданова Д. А. 2, 15
Богусевич М. С. 10, 23
Бойчук М. В. 1, 33
Бокарев Г. Т. 11, 68
Бондалетов В. Н. 5, 74
Бондаренко А. В. 7, 63
Бордюгов В. М. 2, 58
Борю Н. В. 9, 69
Бочаров В. В. 10, 43
Брезинский В. Г., 3, 49
Будзко И. А. 3, 27
Букздорф Н. В. 7, 17
Булатов О. Г. 4, 66; 7, 30
Бурда Е. М. 8, 45
Бурлаков М. Р. 8, 60
Бут Д. А. 9, 29
Бушуев В. В. 12, 1
Быховская О. В. 7, 52

В

Вадачкоря Г. В. 2, 40; 5, 25
Вакорин А. А., 1, 54
Валдырев А. С. 8, 57
Варшавский В. Д. 12, 46
Вашурина А. В. 11, 18
Велиев Т. М. 1, 55
Веников В. А. 1, 17; 2, 15; 4, 1; 7, 14; 11, 1
Вершинин Ю. Н. 9, 72
Вичев С. Т. 2, 61
Владимирский С. А. 3, 39
Власов А. И. 3, 31
Волков Н. Б. 5, 74
Волконский В. А. 3, 64
Воронков В. Н. 4, 55
Воскресенский А. А. 1, 50
Высочанский В. С. 10, 52

Г

Галкин В. И. 10, 55
Гельфанд Я. С. 6, 1; 9, 65
Генералов А. П. 4, 38
Герасимьяк Р. П. 11, 53
Герман Л. А. 6, 46
Гинзбург Г. Б. 1, 1
Глазунов А. А. 1, 17; 2, 20
Глебов И. А. 9, 72; 11, 13; 12, 67
Глузман П. Л. 9, 44
Голоднова О. С. 7, 75
Голован Э. В. 10, 70
Голошапов С. С. 2, 57
Гольдштейн И. А. 3, 71
Гольмаков Ю. И. 9, 24
Готовцев Н. П. 6, 59
Готуа Т. К. 9, 54
Гоффманн И. 3, 59
Гремяков А. А. 2, 15
Григорян М. О. 6, 72
Гринштейн Б. И. 1, 37; 8, 24
Гроднев И. И. 1, 4
Грудинский П. Г. 12, 64
Губарев Г. Г. 1, 64; 12, 50
Гумановский Б. Я. 8, 45
Гурфинкель Е. Б. 5, 63
Гусейнов Ф. Г. 7, 6
Гусейнова Т. И. 6, 74
Гущин Е. В. 12, 48

Д

Давыдов В. Е. 4, 14
Данилевич Я. Б. 11, 1
Данько В. Г. 3, 69
Дворсон А. И. 9, 44
Денисенко Н. А. 3, 59
Денисов А. И. 7, 25
Довганюк И. Я. 7, 10
Додзина Т. Я. 6, 49
Долинский Ю. М. 1, 29; 8, 37
Донской А. В. 12, 18
Драганов В. М. 5, 55
Дралюк Б. Н. 8, 57
Дроздов В. В. 3, 19
Дудник В. Д. 10, 11

Е

Езовит Г. П. 7, 75
Ермуратский П. В. 12, 35
Ершевич В. В. 4, 12
Ефремов И. А. 4, 14

Ж

Жежеленко И. В. 1, 61; 7, 52; 12, 14
Железко Ю. С. 5, 68
Желтов К. А. 3, 44
Жемеров Г. Г. 5, 19
Жилияков В. И. 7, 57
Жмуров В. П. 1, 37
Журавлев В. Г. 4, 75; 5, 59

З

Забелло Е. П. 1, 51
Забора И. Г. 8, 68
Забровский С. Г. 7, 10
Загрядский В. И. 11, 57
Засыпкин А. С. 3, 48
Зезюлькин Г. Г. 7, 59; 8, 74
Зейналов А. Д. 3, 1
Зеликсон Д. Л. 7, 43
Зельцбург Б. А. 6, 65
Зечихин Б. С. 4, 43
Зихерман М. Х. 9, 60
Зонис Е. М. 7, 68
Зонис Ю. М. 7, 68

И

Иванов А. М. 4, 1
Иванов Е. А. 10, 11
Иванов И. А. 10, 26
Иванов-Смоленский А. В. 3, 31
Ивлиев Е. А. 7, 65
Игнатов В. А. 8, 68
Игнатов В. Е. 4, 56

Игнатов И. И. 8, 62
Игуменцев В. А. 5, 1
Идельчик В. И. 4, 73; 6, 56
Икрянников В. И. 4, 60
Ильин А. Г. 1, 67; 6, 68
Илюхин А. И. 11, 61
Имянитов И. М. 4, 76
Инкин А. И. 5, 15
Ионов А. Г. 8, 71
Иоссель Ю. Я. 7, 65; 9, 47
Исаев И. П. 11, 34
Исмаилов З. И. 9, 76
Исхаков А. С., 4, 69
Йондем М. Е. 11, 59

К

Кабанов П. С. 7, 10
Каганов З. Г. 5, 73; 6, 74
Казанский В. Е., 2, 26; 9, 66
Казанский В. М. 2, 1
Казанцев В. Н. 3, 57
Калинин С. Д. 2, 15
Капустина А. Г. 4, 74
Карамян С. Г. 6, 65
Карасев А. В. 1, 67
Карасев В. В. 9, 63
Карепов А. Г. 11, 68
Карпенко Л. Н. 4, 63; 6, 16
Карташов Б. Г. 11, 64
Каспаров Э. А. 11, 7
Керимов А. М. 5, 63
Ким Ги-шен 10, 39
Киселев П. В. 4, 33
Китаенко Г. И. 10, 11
Кленов Г. А. 3, 74; 9, 47
Клепка П. К. 1, 65
Князева О. А. 9, 75
Князь А. И. 5, 55
Кобзев А. В. 4, 27
Ковалев Б. И. 7, 76
Коваленко И. Т. 5, 19
Коваленко Ю. П. 5, 1
Кожеников К. И. 2, 67
Козлов Л. Г. 11, 34
Козырев С. К. 5, 34
Колонский Т. В. 9, 1
Коляда Ю. В. 10, 72
Комаров Д. Т. 2, 77
Комиссаржевский Н. Е. 2, 35
Кондратьев М. П. 1, 51
Конотоп В. В. 12, 50
Константинеску И. Н. 9, 41
Коняев А. Ю. 8, 65
Копяев В. Н. 10, 23
Копылов С. И. 12, 43
Корнеев В. В. 3, 54
Косарев Б. И. 11, 28
Косачевский В. И. 11, 50
Косолапов Г. Н. 11, 28
Костелянец В. С. 5, 11
Костырев М. Л. 10, 58
Красников В. И. 5, 49
Кривенцев В. И. 3, 19; 10, 6
Кривушкин Л. Ф. 4, 12
Крижанский С. М. 8, 33
Кудрявцев Е. П. 4, 19
Кузнецов А. П. 4, 53
Кузнецов В. А. 3, 31
Кузнецов В. Г. 2, 64; 5, 5; 6, 12
Кузнецова Т. А. 2, 20
Кузовкин А. И. 3, 64
Кузьмин А. В. 4, 56
Кузьминский А. С. 7, 43
Кузьмичева Е. В. 6, 42
Кулешов Г. Д. 7, 1
Кулиев М. М. 1, 55
Куликов Н. И. 9, 29
Куликов С. Н. 6, 75
Курбанов М. А. 1, 55
Курганов С. А. 5, 42
Курилин С. П. 9, 50

Кухтиков В. А. 7, 45
Кушнир А. И. 11, 28

Л

Лабунцов В. А. 7, 30
Лавров В. М. 1, 4
Лавров Г. Н. 11, 66
Лазарев Г. Б. 7, 10
Лаптев А. А. 8, 71
Лаптев А. Ф. 10, 23
Ларионов В. П. 7, 41
Лачугин В. Ф. 3, 1
Лебедев Ю. В. 9, 57
Лебедев Ю. М. 4, 27
Левин М. С. 3, 27
Левинштейн М. Л. 4, 14
Ледовский А. Н. 6, 31
Лейтес Л. В. 9, 63
Лепорский В. Д. 7, 14
Либерзон Э. М. 2, 50
Лидоренко Н. С. 4, 1
Липский А. М. 8, 50
Лисеев М. С. 11, 18; 12, 56
Литкенс И. В. 3, 62
Лихошвай И. П. 10, 55
Логинава Л. В. 4, 55
Локарев В. И. 5, 44
Лотоцкий А. П. 10, 26
Лохов С. П. 8, 54
Лукашов Э. С. 9, 75
Львов Е. Л. 8, 41
Лысков Ю. И. 4, 14
Ляхова Н. В. 3, 74

М

Мадаш — Доблер М. 8, 13
Майборода Г. А. 1, 59
Макоклюев Б. И. 4, 55
Малахов В. И. 3, 71
Малинин Л. И. 2, 1
Мамедяров О. С. 5, 65
Мамиконянц Л. Г. 7, 10; 11, 13
Манусов В. З. 10, 1
Мартынов В. А. 3, 31
Матвеев В. Ф. 4, 58
Матвеевичев А. П. 11, 34
Машинян Л. Х. 11, 40
Меерович Э. А. 7, 17
Мейер А. А. 2, 55; 10, 74
Мелешкин В. Н. 5, 29
Месенжчик Я. З. 11, 64
Мещенина М. П. 6, 25
Мирзабекян Г. З. 8, 24
Миронов В. Н. 2, 53
Мирошниченко А. Г. 3, 69
Митькин Ю. А. 4, 74
Михайлов В. В. 8, 52
Могирев В. В. 10, 1
Мозырский В. И. 5, 38
Молиш З. 4, 50
Молодцов В. С. 5, 58
Москалева Р. П. 9, 39
Мотовилов Н. В. 10, 58
Мошинский Ю. А. 12, 59
Мустафа Г. М. 1, 43
Мухачев А. И. 3, 67
Мучник Г. Ф. 4, 1
Мыцки Г. С. 2, 70

Н

Нагорный В. В. 8, 24
Нагорский В. Д. 3, 71
Нажимутдинов М. 11, 18
Назаров П. А. 1, 1
Намитокоев К. К. 3, 49; 8, 27
Наседкина А. Я. 3, 39
Неймарк Г. В. 3, 56
Нетушил А. В. 12, 35
Никифоров Б. Д. 10, 34
Никифорова В. Н. 1, 61

Никиян Н. Г. 11; 59
Новиков В. В. 3, 19, 19
Новгородцев А. Б. 12, 31
Новиков В. Н. 9, 52
Новиков Н. Н. 9, 24
Носик Л. П. 2, 31

О

Обухов С. Г. 2, 53
Овсянников Б. Д. 9, 20
Одынь С. В. 4, 66; 7, 30
Озеров Л. А. 2, 57
Околович М. Н. 6, 42
Орел О. А. 7, 50
Оруджев Ф. Д. 4, 7
Остреров В. М. 12, 27

П

Павликов В. С. 9, 9
Паламарчук С. И. 4, 73
Панасюк В. И. 9, 35
Пархаданов М. М. 5, 66
Пахомов П. Л. 8, 27
Пашкевич В. И. 6, 25
Петров Б. А. 2, 1
Петропавловский А. Ю. 12, 61
Пинц Г. 8, 13
Пинский Г. Б. 12, 48
Пищиков В. И. 8, 74
Подъячев В. Н. 4, 14
Позин М. Б. 6, 72
Покровский С. Ф. 10, 66
Поливанов К. М. 3, 78
Полонская М. А. 3, 11
Польгина Т. Л. 4, 74
Поляков А. В. 2, 55; 3, 74
Пономаренко И. С. 9, 9
Попов И. Н. 3, 1
Попов П. Г. 7, 54
Праздников В. И. 12, 46
Приклонский Е. Н. 5, 61
Проскуряков В. С. 8, 65
Прусс В. Л. 1, 12
Прут Л. Я. 11, 64

Р

Рабинович Р. С. 3, 11
Ражанский И. М. 7, 76
Рахманов Н. Р. 7, 6
Рашкес В. С. 12, 9
Резин М. Г. 8, 65
Резников С. Б. 9, 15; 10, 43
Резницкий А. И. 2, 58
Резниченко В. Ю. 9, 50
Решетов С. А. 3, 23; 11, 23
Решидов И. К. 7, 43
Рогацкий В. Г. 7, 20
Рогачевский В. И. 3, 48; 8, 18
Розанов Ю. К. 8, 41
Ртищев В. М. 1, 54
Рубан Н. С. 10, 70
Руденко В. И. 9, 69
Рыбин В. Н. 1, 54
Рябкова Е. Я. 11, 46

С

Сабинин Ю. А. 2, 1
Савин А. Г. 1, 70
Сагутдинов Р. Ш. 5, 49
Садчиков С. В. 8, 1
Садыков Х. Р. 1, 1
Саламатов И. А. 5, 1
Самулеев В. И. 8, 45
Сарапулов Ф. Н. 8, 65
Саухатас А.-С. С. 10, 45
Свечарник Д. В. 10, 34
Севастьянов В. В. 7, 20
Северин В. П. 1, 64
Селивахин А. И. 4, 53
Сибаров Ю. Г. 10, 23
Сигарев Н. Н. 7, 25

Сидонский И. Б. 4, 27
Сидорский М. А. 1, 37
Синьчугов Ф. И. 11, 76
Сирота И. М. 9, 67
Скобарихин Ю. В. 4, 56
Сколотнев Н. Н. 10, 23
Скопинцев В. А. 11, 18
Скорняков В. А. 4, 63; 6, 16
Скрыль В. Ф. 1, 59
Случанко Е. И. 10, 30
Смирнов А. И. 1, 12
Смирнов К. А. 3, 8; 9, 5
Смирнов С. В. 10, 43
Смирнов Э. П. 2, 75
Соболев В. Г. 5, 51
Совалов С. А. 2, 8
Соколова Г. В. 3, 1
Соколов Н. И. 11, 7
Соколова Е. М. 11, 40
Соколова М. В. 12, 53
Ставинский А. А. 8, 68
Ставровский А. Н. 4, 73
Староверов Г. М. 10, 60
Старовойтова Н. П. 4, 43
Стеблев Ю. И. 6, 62
Степанов В. П. 7, 52
Строев В. А. 2, 15
Ступель А. И. 2, 31
Сумин А. Р. 10, 49
Сурвило И. К. 7, 48
Сурина Г. А. 6, 16

Т

Табак В. Я. 10, 23
Тагаров К. Д. 2, 61
Тайц А. А. 5, 61
Тамкиви В. И. 5, 76
Тарасов В. П. 11, 66
Тарасова Т. Н. 7, 41
Тарикулиев И. Я. 5, 64
Темурджян А. В. 8, 8
Тер-Газарян А. Г. 4, 1
Терещенко Т. Б. 10, 70
Тиходеев Н. Н. 12, 67
Ткаченко Г. И. 8, 52
Толмачев С. Т. 7, 35
Толстов Ю. Г. 7, 10
Трухин В. А. 3, 54
Тугулев В. Н. 4, 14
Туманов И. М. 7, 20
Туркия Н. Г. 9, 54
Тюханов Ю. М. 1, 17; 4, 71

У

Урусов И. Д. 5, 8
Усехин В. Н. 4, 71

Ф

Фабрикант В. Л. 10, 45
Фаерман А. Л. 12, 64
Фархи С. Л. 2, 61
Федоров А. А. 8, 1
Федосеев А. А. 2, 20
Федосов М. И. 6, 59
Федотова Н. В. 3, 62
Фетисов В. В. 6, 25
Фиалков В. М. 9, 72
Филаретов В. В. 5, 42
Филатов А. С. 8, 57
Филиппов И. Ф. 3, 44
Фокин Ю. А. 1, 22; 9, 9

Х

Хансон А. В. 8, 62
Халилов Ф. Х. 4, 76; 5, 75; 7, 76
Харитонов В. Ф. 4, 1
Хачатрян В. С. 8, 8
Хачатурова Е. А. 3, 62
Ходжаев К. Ш. 4, 33
Хоециан К. В. 12, 9

Храмов Л. Ф. 10, 66
Хуторецкий Г. М. 11, 50; 12, 46

Ц
Цфасман Г. М. 2, 31; 6, 37

Ч
Чалисов Ю. И. 6, 49
Чалыян К. М. 7, 17; 9, 71
Чедвик Дж. У. 12, 9
Червяков Л. Н. 1, 50
Чернышов С. К. 8, 71
Чокан Ш. Ч. 1, 1
Чугуев Ю. М. 8, 74

Ш
Шабанов В. А. 10, 45
Шакарян Ю. Г. 7, 10
Шаманов А. П. 3, 67
Шаматава В. Д. 6, 6
Шамин В. Г. 12, 48

Шарабханян И. И. 6, 54.
Шаров С. Н. 7, 68
Шарофидинов Х. Х. 11, 18
Шафир Ю. Н. 8, 18
Шашурин А. К. 12, 61
Шварц З. Л. 8, 24
Шевченко А. Г. 4, 66
Шевякова Н. Б. 2, 70
Шепилов О. Н. 10, 1
Шерер Г. Н. 12, 9
Шилловский А. К. 5, 5
Шиманский О. Б. 12, 14
Шипилло В. П. 7, 59
Шлейфман И. Л. 7, 45
Шнейберг Я. А. 11, 1
Шоффа В. Н. 11, 70
Шперлинг Б. Р. 12, 9
Штибен Г. А. 11, 74

Штильман Б. М. 2, 58
Штрсбель В. А. 2, 15
Шуин В. А. 12, 4
Шульженко С. В. 2, 15; 12, 56
Шумилов Ю. А. 7, 54
Шумилов Ю. Н. 4, 22; 10, 66
Шумский А. Л. 8, 52
Шутько В. Ф. 9, 24

Щ
Щербина Ю. В. 7, 14

Ю
Юдин В. В. 1, 57; 5, 46
Юрченко С. М. 3, 49

Я
Якобс А. И. 6, 6
Яламова Е. Т. 12, 40
Янговский Л. И. 3, 69



Подготовка рукописей для журнала «Электричество»

1. Материал статьи должен быть изложен в строгой и вместе с тем понятной форме для широкого круга научных работников и инженеров. В частности, необходимо пояснить все малоизвестные термины и понятия. Надо помнить, что читателя прежде всего интересует физический смысл рассматриваемых явлений.

Если в статье сообщаются новые разработки (научных и технических проблем), то должны быть показаны их технико-экономические преимущества по сравнению с ранее известными. При изложении новых методов расчетов, исследований и т. п. необходимо давать их сравнительную оценку (по отношению к известным способам) с точки зрения их простоты и затрат времени на изучение и пользование ими.

Перед заглавием статьи желательно проставлять ее индекс в соответствии с универсальной десятичной классификацией (УДК).

Для того чтобы облегчить работу читателя с журналом, авторам необходимо придерживаться следующей структуры статей:

- а) краткое изложение состояния рассматриваемого вопроса и постановки задачи, решаемой в настоящей статье;
- б) метод решения задачи и принятые допущения;
- в) основное содержание статьи — физическая сущность, исходные и конечные математические выражения, эксперименты и расчеты, примеры, иллюстрации;
- г) обсуждение полученных результатов и сопоставление с известными ранее;
- д) выводы и рекомендации;
- е) приложения: доказательства использованных в статье положений, математические выкладки и преобразования;
- ж) список литературы.

2. При написании статьи необходимо избегать применения громоздкого математического аппарата. Сведения, приводимые в статье, должны содержать лишь самый необходимый минимум формул.

Объем статьи с приложением не должен превышать 12 страниц машинописного текста.

3. Статья представляется в двух экземплярах (первый и второй), отпечатанных через два интервала с полями 4—5 см.

4. Формулы вписываются темными чернилами в отдельных строках, а не в тексте.

В том случае, если прописные и строчные буквы имеют одинаковое начертание, прописные буквы рекомендуется подчеркивать двумя черточками снизу, строчные — двумя черточками сверху. Греческие буквы следует заключать в кружок красным карандашом.

При вписывании индексов следует указывать, какие из них латинские и какие русские.

5. Библиографический указатель (список литературы) составляется в порядке последовательности в тексте, при этом указываются:

- а) для журнальных статей — фамилия и инициалы авто-

ра, название статьи, наименование журнала или сборника, год издания, том, номер.

б) для книг — фамилия и инициалы автора или всех авторов, название книги, наименование издательства и город, в котором оно находится, год издания.

Название иностранных работ и работ на языках народов СССР, а также фамилии авторов их должны быть приведены в оригинальной транскрипции и напечатаны на машинке.

В список литературы не следует включать неопубликованные материалы, а также материалы, отпечатанные литографическим и подобным ему способами.

6. Рисунки не должны содержать лишних данных, а все обозначения на рисунках обязательно должны соответствовать ГОСТ. Поясняющие надписи следует по возможности выносить в подпись к рисунку, причем они должны дополнять текст статьи, а не повторять его. Цифровые или буквенные обозначения, имеющиеся на рисунках, необходимо объяснить либо только в подписи к рисунку, либо только в тексте.

Следует учитывать, что при печати рисунки уменьшаются, поэтому детали их не должны быть мелкими, однако размер каждого рисунка не должен превышать 20×30 см.

Фотоснимки должны быть напечатаны на белой глянцевой бумаге. Изображение должно быть контрастным, с резкой проработкой деталей. На одном экземпляре осциллограмм не должно содержаться никаких надписей.

Рисунки и фотоснимки не следует вклеивать в текст статьи; на обороте каждого из них необходимо указывать фамилию автора.

Количество рисунков не должно превышать 7 шт. на 1 авт. лист (не более 1 рис. на 3 стр. машинописного текста), причем необходимо учитывать, что буквенные подразделения графического материала (например, рис. 1, а, рис. 1, б и т. п.) редакция ж. «Электричество» считает за отдельные рисунки.

7. В таблицах все наименования следует указывать полностью, не сокращая слов.

8. К статье необходимо приложить реферат.

Реферат должен дать читателю представление о характере работы, оригинальности постановки вопроса, методике проведения исследования и основных его результатах.

Средний объем реферата — 0,5 стр. машинописного текста, отпечатанного через два интервала на белой писчей бумаге обычного формата (30×20 см) в двух экземплярах, с полем 4 см с левой стороны.

Сообщение о наличии в реферируемой работе библиографических источников необходимо давать в конце реферата. Например: Библ. 9.

9. В конце статьи должны быть указаны фамилия, имя и отчество автора, домашний адрес, место работы, номера домашнего и служебного телефонов.

10. Рукописи статей должны сопровождаться письмом автора и необходимыми документами предприятия (учреждения).

Бушуев В. В. — Применение цифро-аналого-физического комплекса для исследования динамических режимов и устойчивости электроэнергетических систем	
Шуин В. А. — Влияние разряда емкости поврежденной фазы на переходный процесс при замыканиях на землю в кабельных сетях 3—10 кВ	
Беляков Н. Н., Рашкес В. С., Хоециан К. В., Шерер Г. Н., Шперлинг Б. Р., Чедвик Дж. У. — Советско-американские исследования однофазного АПВ в электропередачах 750—765 кВ с четырехлучевыми реакторами	
Жежеленко И. В., Шиманский О. Б. — Электромагнитные помехи в системах электроснабжения промышленных предприятий	
Донской А. В. — Электротехнология в народном хозяйстве СССР	
Беркович Е. И. — Анализ вентиляльных преобразователей с применением модуль-функций	
Остреров В. М. — Определение оптимальных параметров коммутирующих контуров устройств принудительного выключения тиристоров	
Амромин Э. Л., Новгородцев А. Б. — Определение формы электродов конденсатора с постоянной напряженностью на краевых участках	
Нетушил А. В., Ермуратский П. В. — Распределенные параметры конденсаторов	
Яламова Е. Т. — Влияние материала дугогасительной камеры на характеристики дуги в малообъемных масляных выключателях	
Сообщения	
Андрянов В. В., Копылов С. И. — Определение параметров сверхпроводниковых катушек с параллельным соединением секций	

Хуторецкий Г. М., Варшавский В. Д., Праздников В. И. — Выбор размеров седлообразной сверхпроводниковой обмотки возбуждения турбогенератора	46
Ананянц С. С., Гущин Е. В., Пинский Г. Б., Шамин В. Г. — О смещении напряжения нейтрали в обмотках машин переменного тока	48
Губарев Г. Г., Конотоп В. В. — Синтез параметров генератора импульсов напряжения	50
Соколова М. В. — Характеристики разряда в воздушном промежутке с электродом, покрытым твердым диэлектриком	53
Лисеев М. С., Шульженко С. В. — Расчеты установившихся режимов энергосистем с помощью тренажера	56
Анфиногентов О. Н., Беспалов В. Я., Мощинский Ю. А. — Расчет электромагнитного поля в стальной пластине с учетом вихревых токов	59
Шашурин А. К., Петропавловский А. Ю. — Способ расчета параметров пассивной электрической цепи заданной структуры	61
Хроника	
Грудинский П. Г., Фаерман А. Л. — 100-летие Правил устройства электротехнических установок	64
Глебов И. А., Тиходеев Н. Н. — Некоторые достижения и проблемы техники передачи электрической энергии и конструирования крупных генераторов	67
Указатель материалов, помещенных в журнале «Электричество» в 1983 г.	70
Подготовка рукописей для журнала «Электричество»	78

Contents

Application of a Digital-Analog-Physical Model System for Studying Power System Dynamics and Stability — V. V. Bushuyev	
How Discharge of the Faulty Phase Capacitance Influences Transients for Ground Faults in 3—10 kV Cable Networks — V. A. Shuin	
USSR—USA Studies of Single-Phase Automatic Reclosure in 750—765 kV Transmission Systems With Four-Element Reactors — N. N. Belyakov, V. S. Rashkes, K. V. Khojetsian, G. N. Sherer, B. R. Shperling, J. U. Chadwick	
Electromagnetic Interference in Industrial Plant Power Supply Systems — I. V. Zhezhenenko, O. B. Shimanski	
Electrical Technology in the National Economy of the USSR — A. V. Donskoi	
Analysis of Electronic Converters By Means of Modulus-Functions — E. I. Berkovitch	
Optimum Parameters of Switching Circuits in Devices for Forced Deenergization of Thyristors — V. M. Ostrerov	
The Shape of the Electrodes of a Capacitor Having a Constant Field Intensity Along Its Boundary Sections — E. L. Amromin, A. B. Novgorodsev	
Distributed Constants for Capacitors — A. V. Netushil, P. V. Yermuratski	
How the Material of the Chute Influences the Arc Characteristics in Low-Oil-Content Circuit Breakers — E. T. Yalamova	
REPORTS	
The Parameters of Superconducting Coils With Parallely Connected Sections — V. V. Andrianov, S. I. Kopilov	

The Dimensions of a Saddle-Shaped Superconducting Field Winding for a Turbogenerator — G. M. Khutoretski, V. D. Varshavski, V. I. Prazdnikov	46
On Displacement of the Neutral Voltage of A. C. Machines — S. S. Ananyants, E. V. Guschin, G. B. Pinski, V. G. Shamin	48
Synthesis of the Parameters of a High-Voltage Impulse Generator — G. G. Gubarev, V. V. Konotop	50
Characteristics of Discharge Across and Air Gap With an Electrode Having a Solid Dielectric Coating — M. V. Sokolova	53
Calculation of Power System Steady-State Conditions Using a Simulator — M. S. Liseyev, S. V. Shulzhenko	56
Calculating the Electromagnetic Field in a Steel Plate With Account Taken of Eddy Currents — O. N. Anphlogentov, V. J. Respalov, U. A. Moschinski	59
A Technique for Calculating the Parameters of a Passive Electric Circuit of Given Structure — A. K. Shashurin, A. U. Petropavlovski	61
CHRONICLE	
The Centennial of the Electric Installation Code — P. G. Grudinski, A. L. Fayerman	64
Some Achievements and Problems in Electric Power Transmission and Large Generator Design — I. A. Glebov, N. N. Teekhodeyev	67
Contents of the Journal "Electrichestvo" for 1983	70
How to Prepare Manuscripts for the Journal "Electrichestvo"	78

УДК 621.311.016.352.001.57

Применение цифро-аналого-физического комплекса для исследования динамических режимов и устойчивости электроэнергетических систем. — Бушуев В. В. — «Электричество», 1983, № 12. Дан анализ опыта использования гибридных моделирующих систем для оценки режимов и устойчивости электроэнергетических объединений в нормальных и аварийных условиях.

УДК 621.316.925

Влияние разряда емкости поврежденной фазы на переходный процесс при замыканиях на землю в кабельных сетях 3—10 кВ. Шуйн В. А. — «Электричество», 1983, № 12. Рассмотрены результаты исследований переходных процессов при замыкании фазы на землю, выполненных на физической модели кабельной сети с учетом распределенного характера параметров линий. Установлено, что на значения и соотношения электрических величин нулевой последовательности существенное влияние может оказывать разряд емкостей поврежденной фазы линий сети, прежде всего в сетях, содержащих кабельные линии малой протяженности. Библ. 7.

УДК 621.315.1.027.3.001.4

Советско-американские исследования однофазного АПВ в электропередачах 750—765 кВ с четырехлучевыми реакторами. Беляков Н. Н., Рашкес В. С., Хоедиан К. В., Шерер Г. Н., Шперлинг Б. Р., Чедвик Дж. У. — «Электричество», 1983, № 12. Приведены результаты совместных испытаний однофазных АПВ, осуществленных на линиях 750 и 765 кВ со схемами четырехлучевого реактора в СССР и США в рамках советско-американского научно-технического сотрудничества в области электропередач сверх- и ультравысокого напряжения. Библ. 11.

УДК 621.316.176.015.2

Электромагнитные помехи в системах электроснабжения промпредприятий. Жежеленко И. В., Шиманский О. Б. — «Электричество», 1983, № 12. Показано, что степень воздействия электромагнитных переходных помех на электроное оборудование определяется размахом снижения напряжения и крутизной фронта посадки, а также спектральным составом и амплитудами гармоник напряжения сети и текущими значениями углов управления вентильных преобразователей. Предложены способы минимизации параметров и влияния электромагнитных помех. Библ. 5.

УДК 621.314.632.001.5

Анализ вентильных преобразователей с применением модуль-функций. Беркович Е. И. — «Электричество», 1983, № 12. На базе эквивалентных схем замещения вентильных преобразователей предлагается единый для выпрямителей и инверторов метод анализа переходных и установившихся режимов с учетом прерывистости входного тока, наличия угла коммутации при необязательности допущения синусоидальности выходного напряжения (для инверторов) и сглаженности входного тока (для непрерывных режимов). В качестве примера доказывается асимптотическая устойчивость однофазной схемы преобразования в режиме прерывистого входного тока. Библ. 10.

УДК 621.319.4.001.24

Определение формы электродов конденсатора с постоянной напряженностью на краевых участках. — Амромин Э. Л., Новгородцев А. Б. — «Электричество», 1983, № 12. Производится выбор формы краевых участков высоковольтного конденсатора с обкладками в форме дисков конечной толщины, обеспечивающий постоянное значение максимальной напряженности на поверхности обкладок, достигаемое на краевом участке. Задача решается методом последовательных приближений, в процессе которого с помощью решения интегрального уравнения, составленного для поверхности плотности заряда на обкладках, находится распределение напряженности для данной формы краевого участка. Библ. 8.

УДК 621.319.4.011.2.001.24

Распределенные параметры конденсаторов. Нетушил А. В., Ермуратский П. В. — «Электричество», 1983, № 12. Рассматривается цилиндрический «безындукционный» намотанный конденсатор. С помощью метода суперпозиции получены выражения для комплексного сопротивления конденсатора и распределения плотности тока и удельной мощности тепловыделения. Неоднородность распределения тока конденсатора обусловлена влиянием внутреннего магнитного поля, изменяющего распределение плотности тока по радиусу затуханием тока по длине конденсатора. Библ. 11.

УДК 62-83-52

Оптимизация циклических режимов работы электроприводов по энергетическим критериям. Никольский А. А. — «Электричество», 1983, № 12. Рассмотрен синтез оптимальных по энергетическим критериям управления электроприводами постоянного и переменного тока в циклических режимах работы при учете ограничений по нагреву двигателя и его отдельных частей. Найденные управления характеризуются наиболее полным использованием двигателя по нагреву, исключая вместе с тем недопустимые температурные режимы машины. Библ. 9.

УДК 621.3.045:537.312.62.001.24

Определение параметров сверхпроводниковых катушек с параллельным соединением секций. Андрианов В. В., Копылов С. И. — «Электричество», 1983, № 12. Описан метод и результаты оптимизации геометрических и электромагнитных параметров сверхпроводниковых катушек с параллельным включением секций. Показано, что набор размеров секций с учетом зависимости критического тока сверхпроводника от индукции магнитного поля позволяет заметно уменьшить расход сверхпроводника для магнитных систем накопителей энергии. Существенно облегчается решение технических проблем, связанных с разработкой конструкции проводника в сильноточных обмотках. Библ. 8.

УДК 621.313.322-81:537.312.62.001.2

Выбор размеров седлообразной сверхпроводниковой обмотки возбуждения турбогенератора. Хуторецкий Г. М., Баршавский В. Д., Праздников В. И. — «Электричество», 1983, № 12.

Решена задача оптимизации сверхпроводниковой обмотки возбуждения (СПОВ) седлообразной формы с учетом пространственной структуры магнитного поля как в пазовой, так и в лобовых частях СПОВ. Решение осуществляется в виде двух последовательных этапов. На первом этапе решается методом линейного программирования, на втором используются численные методы расчета магнитного поля. Приведены примеры расчетов и даны оценки максимальной индукции в зоне СПОВ и коэффициента запаса по току. Библ. 5.

УДК 621.313.322-82.045.012.8.001.24

О смещении напряжения нейтрали в обмотках машин переменного тока. Анянц С. С., Гушин Е. В., Пинский Г. Б., Шамин В. Г. — «Электричество», 1983, № 12.

Приведены результаты исследований причин, вызывающих асимметрию фазных напряжений гидрогенератора. Даны рекомендации по устранению этой асимметрии. Библ. 1.

УДК 621.373.015.3.001.24

Синтез параметров генератора импульсов напряжения. Губаев Г. Г., Конотоп В. В. — «Электричество», 1983, № 12. Представлена методика синтеза параметров генератора импульсов напряжения на ЦВМ, основанная на решении двухкритериальной задачи нелинейного программирования методом скольжения допуска и применении системного метода интегрирования дифференциальных уравнений жесткой математической модели. Библ. 11.

УДК 537.52.001.6

Характеристики разряда в воздушном промежутке с электродом, покрытым твердым диэлектриком. Соколова М. В. — «Электричество», 1983, № 12.

Изложены результаты экспериментального исследования особенностей разряда в воздушном промежутке, ограниченном металлическим электродом и электродом, покрытым диэлектриком (стекло, оргстекло).

Анализируются возможные причины уменьшения плотности заряда на диэлектрике. Сделано предположение о возникновении незавершенных разрядов, характеризующихся меньшими амплитудами импульсов тока разряда. Библ. 8.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Бертинов А. И., Будзко И. А., Веников В. А., Глебов И. А., Евсеев Б. Н. (зам. главного редактора), Ефремов И. С., Иванов-Смоленский А. В., Ильинский Н. Ф., Комельков В. С., Костенко М. В., Лабунцов В. А., Ларионов В. П., Лидоренко Н. С., Лизунов С. Д., Мамиконянц Л. Г. (главный редактор), Меерович Э. А., Мучник Г. Ф., Нетушил А. В., Сабинин Ю. А., Слежановский О. В., Совалов С. А., Тареев Б. М., Тиходеев Н. Н., Толстов Ю. Г., Федосеев А. М., Шакарян Ю. Г., Шаталов А. С., Шилин Н. В.

Научные редакторы: А. Б. Желдыбин, Б. Д. Макарьин

Адреса редакции: 103012, Москва, К-12, Б. Черкасский пер., 2/10. Телефон 294-24-80.

101000, Москва, Главный почтамт, абонентный ящик № 648

Адрес для телеграмм: Москва, 12, ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Технический редактор Н. Н. Хотулева

Сдано в набор 14.10.83

Подписано в печать 06.12.83

Т-22254

Формат 60×90¼

Печать высокая.

Усл. печ. л. 10

Усл. кр.-отт. 10,75

Уч.-изд. л. 13,88

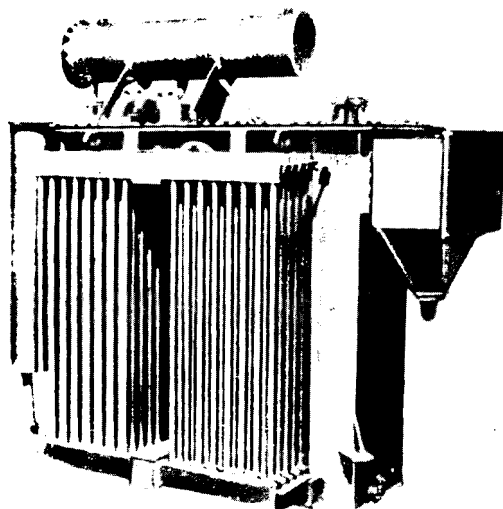
Тираж 5714 экз.

Заказ 2792

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Ордена Трудового Красного Знамени Чеховский полиграфический комбинат ВО «Союзполиграфпром» Государственного комитета СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли, г. Чехов Московской области

ON OUR EXPORTS LIST



TRANSFORMERS IN THE
TROPICAL-CLIMATE MAKE,

WITH ENHANCED ECONOMY OF
ELECTRIC ENERGY CONVERSION

Capacity, kV·A 12, 500 or 1000

Voltage, kV 11/0.433 (or 0.4, or 0.415)

Our TRANSFORMERS are in full
compliance with British and IEC
Standarts



ENERGOMACHEXPORT

Korp. 4, 1, Deguninskaya Ul., Moscow,
USSR. Phone 487-31-82

Telex 411965 ENEK SU
411926 ENEK SU