

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

*Да здравствует 57-я годовщина Великой
Октябрьской социалистической революции!*

(Из Призывов ЦК КПСС к 57-й годовщине Великой Октябрь-
ской социалистической революции)



1974

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»

11

Трудящиеся Советского Союза! Добивайтесь высокой производительности труда и эффективности производства, стремитесь дать продукции большие, лучшего качества, с меньшими затратами!

(Из Призывов ЦК КПСС к 57-й годовщине Великой Октябрьской социалистической революции)

УДК 621.311.016.4.002.237

Народнохозяйственное значение повышения качества электроэнергии

Доктор техн. наук ВЕНИКОВ В. А., доктор техн. наук ЛИБКИНД М. С.

Москва

доктор техн. наук КОНСТАНТИНОВ Б. А.

Ленинград

Научно-технический прогресс характеризуется использованием в народном хозяйстве новых материалов, новых технологических процессов, новых источников энергии и способов преобразования и распределения энергии, новых электроприемников с высокими параметрами и технико-экономическими показателями. Наряду с этим существующие источники, средства преобразования и распределения, а также приемники электроэнергии подвергаются значительной реконструкции с изменением их параметров и показателей. В производство внедряется вычислительная техника, создаются автоматические комплексы, внедряются автоматизированная система управления технологическими процессами и автоматизированная система управления производством. Все это особенно сильно сказывается на повышении требований к качеству электроэнергии, подводимой к электроприемникам (электропривод, электротехнологические процессы, электрическое освещение), и к надежности их электроснабжения. Комплексное решение вопросов улучшения качества электроэнергии и повышения надежности электроснабжения является основой обеспечения необходимого качества систем электроснабжения объектов народного хозяйства.

Улучшение качества электроэнергии в любой отрасли промышленности приводит к созданию условий нормального протекания технологических процессов, а это, в свою очередь, способствует выпуску запланированного количества продукции при надлежащем ее качестве. Данное положение справедливо и для сельскохозяйственного производства. Повышение качества электроэнергии оказывает значительное влияние на улучшение социальных

условий жизни населения в городах и сельских местностях.

Под качеством электрической энергии у ее приемников понимается совокупность ее потребительских свойств, обуславливающих работоспособность различных электроприемников в соответствии с их назначением. Согласно ГОСТ 13109-67 к показателям качества электроэнергии у ее приемников при питании от электрических сетей трехфазного тока относятся: отклонения и колебания частоты, отклонения и колебания напряжения, несинусоидальность формы кривой напряжения, смещение нейтрали и несимметрия напряжений основной частоты.

В электроэнергетических системах европейской части СССР понижение частоты на 0,1 гц против номинального значения в течение часа может привести к уменьшению выработки валовой продукции в промышленности примерно на 200 тыс. руб. [Л. 1]. Современные автоматические устройства для регулирования частоты позволяют полностью соблюдать установленные нормативы в отношении отклонений частоты, стабильность которой зависит только от энергетических систем. Что же касается других показателей качества электрической энергии, то они зависят в значительной степени и от потребителей электроэнергии.

Мощность потребителей электроэнергии, особенно промышленных предприятий, непрерывно возрастает; увеличивается мощность отдельных электроприемников, в том числе с резкопеременной нагрузкой. С другой стороны, увеличение мощности электростанций и объединение энергосистем имеют своим следствием возрастание токов короткого замыкания, для ограничения которых приходится

повышать индуктивное сопротивление цепи, по которой электроэнергия поступает к приемникам. Все это вызывает значительные отклонения и колебания напряжения, т. е. нарушения качества электроэнергии.

Важным показателем качества электроэнергии является отклонение напряжения. Как известно, отклонение напряжения от номинального значения в условиях нормальной работы промышленных электроустановок допускается в пределах от -5 до $+10\%$ на зажимах электродвигателей и их пуско-управляющих аппаратов, от $-2,5$ до $+5\%$ на зажимах осветительных электроприемников и от -5 до $+5\%$ на зажимах остальных электроприемников.

Как показали исследования, проведенные ЛИЭИ, при снижении напряжения на 10% производительность некоторых промышленных электропечей снижается на 12% , а электролизных ванн для производства алюминия — на 10% . Повышение напряжения в промышленной осветительной сети на $5-10\%$ приводит к преждевременному выходу из строя осветительных ламп с ущербом в среднем 100 руб. в год на 1000 установленных ламп накаливания и 80 руб. на 1000 люминесцентных ламп. Достаточно сказать, что повышение напряжения на 5% снижает срок службы лампы накаливания вдвое. На ряде производств можно проследить связь изменения показателей качества энергии и изменений материальных характеристик выпускаемой продукции, часто условно выражаемых в виде так называемых «ущербов». Так, в текстильной промышленности на ряде предприятий было выявлено, что на 1% снижения напряжения за пределами нормативных значений и на 1 квт·ч потребленной за этот период времени электроэнергии появляется снижение в размере $0,1-0,5$ коп. производственных показателей, которые могут быть оценены как удельный ущерб.

Частота вращения асинхронных двигателей, приводящих в движение металлорежущие станки, даже при заметных отклонениях напряжения изменяется незначительно. Но и такое изменение частоты вращения вызывает при поточной системе производства и автоматическом управлении снижение его экономических показателей. Уменьшение вращающего момента асинхронных двигателей при снижении напряжения происходит в квадратичной зависимости, что создает затруднения при пуске таких двигателей под нагрузкой и замедляет производственный процесс. В отдельных производствах отклонения напряжения в сторону снижения даже в пределах нормативных значений вызывают либо значительное удлинение технологического процесса, либо его расстройство.

Рост мощности прокатных станов с периодической ударной нагрузкой, резко переменных нагрузок дугowych электропечей большой мощности и сварочных агрегатов вызывает колебания напряжения в сети, ухудшающие технико-экономические показатели других электроприемников. При этом ряд «спокойных» установок вообще не может работать из-за нарушения и даже вынужденного прекращения технологических процессов, что приводит к значительным убыткам.

Возрастают количество и мощность вентильных преобразовательных установок, особенно тиристорных, которые являются причиной появления высших гармоник. В результате возникает заметное искажение формы кривой напряжения и тока в сети. Хотя по существующим нормативам действующее значение всех высших гармоник напряжения не должно превышать 5% от действующего значения напряжения основной частоты, в практических условиях оно нередко достигает 15% . При этом значительно повышаются потери мощности в электроустановках и снижается их надежность, нарушается работа систем релейной защиты, автоматики, телемеханики, связи и вычислительных машин.

Батареи конденсаторов, установленные в узлах сети, питающей вентильные преобразователи, могут вызвать резонансные явления на повышенных частотах; наличие высших гармоник часто становится причиной выхода из строя конденсаторов. Эффективным способом борьбы с высшими гармониками является применение параллельных фильтров, настроенных на определенную частоту, и включение реакторов последовательно с батареями конденсаторов.

Вследствие неравномерного включения осветительных приемников по фазам и применения однофазных индукционных электропечей, не всегда снабженных соответствующими симметрирующими устройствами, имеет место несимметрия трехфазной системы напряжения, характеризуемая напряжением обратной последовательности основной частоты, а также наблюдается смещение нейтрали, характеризующееся напряжением нулевой последовательности. Несимметрия приводит к неодинаковым отклонениям напряжения по фазам, к снижению пропускной способности элементов сети по условиям нагрева, к дополнительному нагреву электродвигателей и увеличению потерь активной мощности и энергии в системе электроснабжения. Установлено, что срок службы полностью нагруженного асинхронного двигателя, работающего при несимметрии в 4% , сокращается до 2-х раз, что ведет к ухудшению экономических показателей. Для снижения напряжения обратной последовательности применяется симметрирование рабочих режимов с использованием емкостей и индуктивностей; представляется также целесообразным использовать как симметрирующие емкостные устройства для компенсации реактивной мощности. Вообще многофункциональное использование устройств, предназначенных для повышения качества электроэнергии, заслуживает внимания.

Итак, анализ данных отечественной и зарубежной литературы и проведенные экспериментальные исследования показали, что ухудшение показателей качества электроэнергии приводит к следующим последствиям: снижению количества и качества выпускаемой продукции; порче сырья и материалов; расстройству технологических процессов; простоя рабочей силы; повышению аварийности и повреждаемости оборудования; снижению срока службы оборудования; увеличению потерь активной и реактивной мощности и энергии. Для определения целесообразных способов обеспечения должного качества электроэнергии большое значение имеет

определение ущерба, возникающего при работе предприятия в условиях, когда качество электроэнергии отличается от нормативного значения.

Далеко не везде этот ущерб может быть выявлен. На объектах коммунально-бытового потребления электроэнергии, в механических цехах машиностроительных предприятий с выпуском многоменклатурной продукции определить денежное выражение народнохозяйственного ущерба из-за ухудшения показателей качества электроэнергии практически невозможно. Это вызывается наличием многочисленных трудноопределяемых факторов, влияющих в той или иной степени на возможный ущерб. Приходится при этом учитывать и то обстоятельство, что снижение выпуска промышленной продукции из-за понижения качества электроэнергии и из-за аварийных перерывов электроснабжения не может по сути дела быть определено на основе ценностных показателей и не только из-за условностей установления цен, но и из-за тех особенностей многих промышленных производств, благодаря которым вся сумма годовых и цеховых расходов остается практически неизменной.

В ряде зарубежных энергосистем к определению «ущерба» относятся весьма осторожно, справедливо полагая, что его невозможно определить в наиболее ответственных случаях. Так, не удалось определить ущерб от известной аварии в системе США в ноябре 1965 г. и ряда последующих аварий. Очень осторожно относятся к показателю ущерба, например, во Франции, где четко различают «коммерческий ущерб» (убытки, которые потерпел абонент) и «общественный ущерб», причем последний в отличие от первого оценивается только условно.

Следует указать, что применительно к народному хозяйству нашей страны переоценка этого показателя, его излишняя абсолютизация также не оправданны, тем более неправомерны попытки «точного» определения ущерба при неточности исходных данных. Сказанное, однако, не означает, что на ряде промышленных объектов ущерб от снижения качества электроэнергии не может быть определен с достаточной для практических целей точностью. Такое определение, разумеется, возможно при специальной постановке исследований, которая в общем случае может быть основана на одном из трех способов определения ущерба: с помощью экономических характеристик электроприемников или узлов нагрузки; непосредственным учетом ущерба на производстве; проведением натурных экспериментов.

Выявление ущерба имеет значение не столько для прямого сопоставления его величины в денежном выражении со стоимостью намеченных мероприятий по повышению качества электроэнергии и определения их экономического эффекта, что в отдельных случаях возможно, сколько для выработки нормативных показателей и создания обоснованных нормативов по качеству электроэнергии и надежности электроснабжения. Реализация соответствующих мероприятий, осуществленных, например, по предложению ЛИЭИ на ряде промышленных предприятий, оказалась весьма эффективной.

Данные, касающиеся экономического эффекта при проведении мероприятий по улучшению качест-

ва электроэнергии в промышленности и сельском хозяйстве, приводятся также в литературе [Л. 2].

С учетом сделанных выше замечаний об условности ущерба и осторожности пользования этим показателем, его можно определить при работе предприятия с пониженным качеством электроэнергии с помощью следующих составляющих:

$$\sum_{i=1}^m Y_i = Y_{\Delta f} + Y_{\Delta f_t} + Y_U + Y_{U_t} + Y_{U_{-, U_0}} + Y_{U_T},$$

где $Y_{\Delta f}$, $Y_{\Delta f_t}$, Y_{U_t} , $Y_{U_{-, U_0}}$, Y_{U_T} — математические

ожидания ущерба от отклонений частоты, от колебаний частоты, от отклонений напряжения, от колебаний напряжения, от несимметрии напряжений и смещения нейтрали, от несинусоидальности формы кривой напряжения.

При выборе варианта устройств для повышения качества электроэнергии рекомендуется соблюдать условие:

$$\sum_{i=1}^m Z_i \leq \sum_{i=1}^m Y_i,$$

где $i = 1, 2, \dots, m$ — количество рассматриваемых

показателей качества электроэнергии; $\sum_{i=1}^m Z_i$ — сум-

ма приведенных затрат на мероприятия для повышения качества электроэнергии по всем показателям от i до m ; $\sum_{i=1}^m Y_i$ — суммарный ущерб от нару-

шения требуемого качества электроэнергии по всем от i до m показателям.

Как показывают исследования, в ряде случаев ущерб достигает значительной величины даже при соблюдении показателей качества электроэнергии в пределах ГОСТ 13109-67.

Критерий оптимизации показателей качества электроэнергии можно представить в виде приведенных затрат:

$$Z(\epsilon) = E_n K(\epsilon) + C(\epsilon) + Y(\epsilon),$$

где ϵ — совокупность показателей качества электроэнергии; $K(\epsilon)$ — капитальные затраты, связанные с повышением качества электроэнергии; $C(\epsilon)$ — ежегодные затраты; $Y(\epsilon)$ — математическое ожидание ущерба от работы электроприемников при пониженном качестве электроэнергии; E_n — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений.

Анализ данного выражения на примере ряда предприятий показал, что с повышением качества энергии капитальные затраты увеличиваются, ежегодные затраты не изменяются или растут за счет амортизационной составляющей, а величина ущерба уменьшается. Имея данные по ущербу от плохого качества энергии и по эффективности затрат на повышение качества энергии, можно получить оптимальное для конкретного предприятия значение того или иного показателя качества электроэнергии.

Трудности определения ущерба, кроме указанных выше, заключаются еще и в том, что не прово-

дится систематический сбор и обработка данных о фактических показателях качества электроэнергии и необходимой технико-экономической информации об ущербах по конкретным установкам. Между тем сбор этих сведений и издание на их основе нормативов приобретает особое значение в современных условиях, когда разрабатываются основы АСУ и АСУП и, в частности, автоматизированные системы управления качеством продукции. Совершенствование управления качеством электроэнергии значительно повысит эффективность энергетического производства.

Изложенное выше показывает необходимость проведения систематического контроля показателей и организации управления качеством электроэнергии, причем под управлением качеством электроэнергии можно понимать установление, обеспечение и поддержание необходимого уровня качества электроэнергии при ее производстве, распределении и потреблении, осуществляемые путем систематического контроля качества и целенаправленного воздействия на условия и факторы, влияющие на качество электроэнергии.

Поскольку качество энергии зависит как от энергосистем, так и от потребителей, важно установить надлежащие правовые формы и материальные стимулы для поставщиков и потребителей, обеспечивающие поддержание нормируемых показателей качества электроэнергии. В этом отношении требуются энергичные согласованные действия.

III. Всесоюзное научно-техническое совещание по качеству электрической энергии, проведенное в Баку в сентябре 1973 г., рекомендовало следующие основные направления научных исследований.

1. Продолжение исследований по количественному определению ущерба, возникающего в промышленности и сельском хозяйстве, а также в энергосистемах при отклонении показателей качества от нормативных значений и экономического эффекта от улучшения этих показателей.

2. Разработка методики проектирования электрических сетей (включая применение специальных технических средств), обеспечивающего выполнение требований по надежности и экономичности работы сетей и качеству электроэнергии.

3. Изыскание новых способов ограничения токов короткого замыкания, не связанных с увеличением внутреннего сопротивления сети в нормальных режимах.

4. Продолжение исследований по оптимальному регулированию напряжения и управлению источниками реактивной мощности.

5. Продолжение исследований по созданию новых статических устройств для компенсации реактивной мощности, регулирования напряжения и улучшения других показателей качества энергии, в частности многофункциональных устройств.

6. Техничко-экономические исследования с целью определения областей целесообразного применения различных компенсирующих и других устройств, улучшающих качество электрической энергии.

7. Продолжение исследований по созданию комплексных систем автоматического управления режимами напряжения в электрических сетях.

8. Исследование старения изоляции и иных явлений в конденсаторах, кабелях и других элементах электрических сетей, обусловленных наличием высших гармоник.

9. Определение требований к качеству энергии по условиям использования электрических двигателей в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства.

10. Разработка принципов организации и методических основ производства контрольных измерений показателей качества электроэнергии.

11. Разработка измерительных систем для массового контроля качества электрической энергии по всем ее показателям.

12. Применение методов теории подобия и многофакторного планирования эксперимента при исследовании характеристик энергосистем.

Качество электроэнергии является важнейшим комплексным показателем, тесно связанным с надежностью электроснабжения, и зависит не только от факторов, действующих в процессе эксплуатации, но и от уровня проектирования и сооружения электроэнергетических объектов.

Мероприятия, направленные на улучшение и обеспечение на должном уровне качества электроэнергии, должны предусматривать прежде всего высокое насыщение автоматикой современных электроэнергетических систем как в стадии проектирования, так и в эксплуатации. В число указанных мероприятий должны входить проектные разработки по правильному размещению регулируемых источников реактивной мощности. Большое значение для повышения качества электроснабжения, в том числе и качества электроэнергии, должно иметь применение новых быстрорегулируемых статических устройств для выдачи и потребления реактивной мощности.

Дальнейшее развитие энергосистем и электроэнергетических объектов потребителей заставляет обратить большое внимание на разработку мероприятий по повышению качества электроэнергии и надежности электроснабжения, на дальнейшее улучшение нормативных показателей и в некоторых случаях на создание новых нормативов. Основой для решения этих вопросов является экономическая эффективность. Если за счет проведения мероприятий по улучшению качества электроэнергии в энергетических системах, промышленности и сельском хозяйстве добиться экономии электроэнергии в размере всего лишь 1% вырабатываемой в нашей стране электроэнергии, то экономия составит около 10 млрд. кВт·ч в год, что соответствует 100 млн. руб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Задачи энергетиков в 1974 г.— «Электрические станции», 1974, № 1.
2. Тезисы докладов на III Всесоюзном совещании по качеству электрической энергии, г. Баку 18—20 сентября 1973 г. М., изд. ЭНИН, 1973, с. 133.

[1.8.1974]



Несимметрия напряжений в трехфазных электрических сетях и способы ее снижения

Канд. техн. наук СОЛДАТКИНА Л. А.

Московский энергетический институт

При наличии несимметрии напряжений и токов фаз в трехфазных электрических сетях возникает ряд нежелательных явлений, ухудшающих технические и экономические показатели работы этих сетей: увеличение потерь мощности и энергии в элементах сети, ухудшение режима напряжений на зажимах электроприемников, неправильная работа устройств релейной защиты и автоматики, перегрузка, дополнительный нагрев и, как следствие, ускорение износа электрооборудования, в частности, асинхронных электродвигателей и т. п. [Л. 1—3]. При этом возникает парадоксальное явление: при несимметрии напряжений не только увеличивается расход энергоносителя на электростанциях на покрытие потерь энергии, но этот энергоноситель фактически расходуется на перегрев двигателей. Для нормализации положения в ГОСТ 13109-67 [Л. 6] установлены предельно допустимые показатели несимметрии напряжений, которые должны быть обеспечены при проектировании и эксплуатации трехфазных электрических сетей.

Таким образом, возникает задача оценки получаемой несимметрии напряжений и токов и в случае ее недопустимости принятия специальных мер для нормализации параметров рабочих режимов. К таким мероприятиям относятся: применение помимо основного оборудования специальных дополнительных симметрирующих устройств, изменение параметров элементов распределительных сетей (например, увеличение сечений проводов, изменение схемы соединения обмоток распределительных трансформаторов и т. п.) и др.

Очевидно, выбор наиболее целесообразных способов и средств нормализации параметров режимов должен производиться на основании соответствующего технико-экономического анализа. Исходные данные для такого анализа зависят от назначения сети, ее конструктивного выполнения, характера изменения нагрузок и т. п. Ниже рассматриваются наиболее характерные условия.

В общем случае возникновение несимметрии напряжений в трехфазных электрических сетях может обуславливаться различными причинами:

1) несимметрией нагрузок фаз сети; 2) неполнофазными режимами работы трехфазной сети; 3) несимметрией параметров фаз линий.

Несимметрия параметров фаз линий практически проявляется в воздушных линиях напряжением 330 кВ и выше [Л. 4]. К неполнофазным режимам относится, например, режим при отключении одной фазы воздушной линии. Такие режимы обычно не являются длительными и используются в сетях напряжением 35—110 кВ и выше для проведения ремонтных работ на повреждаемой фазе. При этом может быть обеспечено электроснабжение всех или части потребителей, питающихся от одноцепной воздушной линии. Методы расчетов по проверке

допустимости указанных режимов известны (например, [Л. 4 и 5]).

В статье рассматривается вопрос о несимметрии напряжений, возникающей из-за несимметричных нагрузок фаз в промышленных, городских и сельских сетях напряжением 6—20 кВ [сети среднего напряжения (СН)] и напряжением до 1000 В [условно сети низкого напряжения (НН)]. Для этих сетей практически можно считать, что параметры элементов сети являются симметричными, и не учитывать отключение отдельных фаз линий и трансформаторов. Анализ несимметрии параметров режима при этом необходимо проводить отдельно для сетей разного назначения, что связано с различными условиями их работы. Приходится рассматривать отдельно промышленные сети, а также городские и сельские сети (в дальнейшем сокращенно говорится только о городских сетях). Это связано с тем, что для этих сетей различаются как причины возникновения несимметрии напряжения и токов, так и мероприятия по их нормализации.

Промышленные сети. Трехфазные сети СН и сети НН в основном выполняются трехпроводными. Четырехпроводными выполняются трехфазные сети НН, питающие осветительные электроприемники и мелкие электродвигатели. Протяженность этих сетей обычно невелика, электроприемники небольшой мощности распределяются относительно равномерно между отдельными фазами сети; в случае необходимости перераспределение нагрузок может быть легко осуществлено. Поэтому в этих сетях практически не возникает значительной несимметрии напряжений.

В трехпроводных трехфазных сетях несимметрия напряжений вызывается прежде всего однофазными нагрузками относительно большой мощности, обуславливающими токи и напряжения обратной последовательности. Основным показателем несимметрии в этих сетях является напряжение обратной последовательности U_2 . В целях обеспечения приемлемых условий работы электроприемников в распределительных сетях допускаются сравнительно малые значения U_2 (не более 2—3% [Л. 6]).

Диапазон мощностей однофазных нагрузок, присоединяемых к трехпроводным промышленным сетям, велик — от сотен киловатт (нагрузки питаются от сетей СН и НН) до десятков мегаватт (питаются от сетей более высокого напряжения, например 110 кВ). Однофазными выполняются многие электротермические установки, которые в зависимости от конструктивных или технологических особенностей не могут быть выполнены трехфазными или же имеют в трехфазном исполнении более низкий к. п. д. (индукционные плавильные и нагревательные печи, графитировочные печи и др.). Мощность каждой однофазной печи может достигать 10—

20 Мвт [Л. 3]. Однофазными являются и установки для электросварки, единичные мощности их достигают 1500 и более киловатт. Удельный вес этих установок может быть значительным, на отдельных машиностроительных предприятиях суммарная мощность сварочных агрегатов может достигать половины от общей нагрузки. Нагрузка этих установок резко переменная, что ведет также к возникновению колебаний напряжения.

В ряде трехфазных установок, например в трехфазных электродуговых печах, нагрузка отдельных фаз на определенных стадиях технологического процесса оказывается существенно различной. При этом изменение нагрузок носит случайный характер; одновременно с несимметрией возникают колебания напряжения, высшие гармоники токов и напряжений.

Организации, разрабатывающие технологическую часть однофазных установок, пытаются принять меры для обеспечения более симметричной нагрузки трехфазной сети. Например, стараются включать однофазные установки группами по три. Однако во многих режимах в работе находится не группа из трех, а лишь одна или две однофазные установки. В других случаях для обеспечения симметричной нагрузки трехфазной сети однофазные установки, например электротермические, снабжаются специальными дополнительными симметрирующими устройствами. Симметрирование однофазных нагрузок при этом осуществляется с помощью специальных трансформаторных агрегатов или индуктивно-емкостных преобразователей, включаются специальные элементы для обеспечения достаточно высокого коэффициента мощности нагрузки. Таким образом, в симметрирующих устройствах используются дополнительные конденсаторы, дроссели, трансформаторы и т. п. При симметрировании установок с переменными параметрами эти устройства могут выполняться управляемыми и снабжаться переменными симметрирующими элементами.

В зависимости от технологических условий в промышленных сетях может возникать несимметрия напряжений различного характера: неизменная для длительных периодов времени и переменная во времени (т. е. изменяющаяся через относительно небольшие промежутки времени). Характер возникающей несимметрии определяет мероприятия по ее снижению.

Практически неизменная несимметрия напряжений возникает в сетях с относительно стабильным графиком изменения нагрузок фаз. Эти условия характерны, например при наличии однофазных электротермических установок со спокойным режимом работы. Здесь следует различать два случая: а) число однотипных однофазных установок кратно числу фаз сети, при этом несимметрия нагрузок возникает лишь в периоды отключений отдельных установок, например для производства ремонтных работ и т. п. (эти периоды также могут быть достаточно длительными); б) число однофазных установок не является кратным числу фаз сети, например к трехфазной сети присоединены одна или две однофазные установки. В рассматриваемых условиях нормализация напряжений сети может быть обеспечена применением симметрирующих

устройств с более простыми схемами [Л. 3 и 7], режимы их работы могут изменяться вручную эксплуатационным персоналом по мере необходимости (условия для обеспечения этого должны быть предусмотрены при проектировании сети).

В ряде случаев здесь успешно могут быть использованы конденсаторы, устанавливаемые в промышленных сетях для компенсации реактивной мощности (для этого они должны выполняться однофазными). В приложении 1 приведен графоаналитический метод выбора мощностей однофазных конденсаторов, которые должны быть присоединены к различным фазам сети для снижения несимметрии напряжений. С помощью конденсаторов не всегда могут быть получены удовлетворительные результаты, так как при этом обычно значение U_2 может быть снижено не более, чем на 2—4%. В то же время на предприятиях могут иметься другие однофазные нагрузки, которые также могут быть использованы для симметрирования режима. Методика определения мощностей однофазных нагрузок, которые следует присоединять к различным фазам сети для симметрирования их нагрузок, приведена в приложении 2.

Вопрос о целесообразности использования конденсаторов для симметрирования напряжений требует дополнительных исследований. В ряде случаев при мощных источниках питания получаемые значения U_2 относительно невелики, даже при значительных величинах мощностей однофазных нагрузок $S_{\text{одноф}}$ (приблизительно можно принять, что $U_2 \approx (S_{\text{одноф}}/S_{\text{к.з}}) \frac{100}{\sqrt{3}}$, где $S_{\text{к.з}}$ — мощность короткого замыкания в рассматриваемой точке сети). Поэтому использование конденсаторов без применения дополнительных симметрирующих устройств может быть достаточно эффективным. Если мощность установленных для компенсации реактивной мощности конденсаторов недостаточна для полного симметрирования, она может быть достаточной для симметрирования до приемлемой величины U_2 в сети [Л. 10].

Переменная во времени несимметрия напряжений обусловлена изменением режима нагрузок фаз сети. Она часто сопровождается появлением колебаний напряжений, а в ряде случаев и высших гармоник токов и напряжений. Эти условия характерны, например, для мощных дуговых электропечей. При этом может возникнуть задача об одновременном улучшении всех указанных показателей качества электроэнергии, например применением комплекса дополнительных устройств — симметрирующих, фильтрующих, снижающих колебания напряжения.

К сожалению, в настоящее время в области симметрирования напряжений в промышленных сетях сделано недостаточно. Соответствующие работы ведутся в Институте электродинамики АН УССР [Л. 2 и 7], ВНИИЭТО [Л. 3] и других организациях, однако они еще не далеки от завершения. Неясны технико-экономическая целесообразность и возможные области применения предлагаемых устройств, практически отсутствует координация работ, выполняемых различными организациями, нет приборов по оценке величины несимметрии напряжений и т. д.

В ряде случаев нормализация параметров рабочего режима в системах электроснабжения промышленных предприятий практически достигается путем применения излишне большого количества дополнительных устройств. Это связано с тем, что обычно каждый из параметров качества электрической энергии рассматривается отдельно. Таким образом принимаются частные решения по регулированию напряжения, симметрированию трехфазной системы напряжений, снижению гармоник и т. д. Для ряда установок уже приняты конкретные решения, например, как указывалось выше, отдельные однофазные электротермические установки укомплектовываются специальными симметрирующими устройствами [Л. 3 и 7].

При достаточно большом количестве этих установок число симметрирующих устройств в одной и той же системе электроснабжения может получаться достаточно большим. Поэтому возникает задача оптимизации проектных решений с выявлением возможности расширения функций отдельных устройств. При этом требует проверки возможность объединения отдельных устройств (см., например, [Л. 2]), использования меньшего числа устройств большой единичной мощности и т. д. При выборе параметров этих устройств следует считаться с достигаемым экономическим эффектом.

Оптимизация проектного решения должна заключаться в выборе типа дополнительных устройств, их числа и мощности, а также размещения в системе электроснабжения, выборе характера и законов регулирования параметров. При этом выясняется возможность применения устройств с неизменными параметрами или со ступенчатым их изменением, необходимость быстрого действия, а также параметры регулирования.

На основании соответствующих расчетов для типовых случаев должны быть выявлены технические требования к симметрирующим (и другим дополнительным) устройствам. Они должны быть стандартизованы и выпускаться электропромышленностью серийно.

Дополнительные задачи возникают в условиях эксплуатации. Требуется систематический контроль за показателями несимметрии (U_2) в промышленных сетях (как правило, этот контроль должен быть статистическим). Для полноценного использования дополнительных устройств и проведения всестороннего технико-экономического контроля за текущим режимом должна производиться специальная подготовка эксплуатационного персонала.

При технико-экономическом анализе вопроса о симметрировании параметров режимов для промышленных сетей необходимо производить соответствующие расчеты. В настоящее время существуют некоторые упрощенные методы, которые могут быть использованы для оценки, например мощности конденсаторов, используемых для симметрирования (см. приложения 1 и 2). Однако в ряде случаев должны проводиться более точные расчеты. Это касается, в частности, параметров симметричных нагрузок, которые присоединяются к тем же сетям, что и однофазные нагрузки. Ранее параметры этих нагрузок учитывались слишком упрощенно — обыч-

но симметричная нагрузка представлялась в виде единой комплексной нагрузки и замещалась сопротивлением обратной последовательности Z_2 [Л. 5]. Такое представление симметричных нагрузок в схеме замещения сети было правомерным при анализе резко несимметричных режимов, например режимов несимметричных коротких замыканий. Однако при анализе нормальных режимов с относительно небольшой степенью несимметрии напряжений такое представление симметричных нагрузок в схеме замещения является недостаточно оправданным и требует уточнений. Принципиальные предложения о возможностях такого уточнения их имеются [Л. 12], однако этот вопрос требует дополнительного исследования. Кроме того, необходимо получить дополнительные исходные данные (вольт-амперные характеристики и пр.) для типовых потребителей.

Городские сети. В районах с коммунально-бытовой нагрузкой трехфазные сети НН сооружаются четырехпроводными с нулевым проводом. К этим сетям присоединяется большое количество однофазных электроприемников (осветительных и бытовых). Мощность этих приемников относительно небольшая¹ — обычно до 600—800 вт, мощность однофазных электроплит достигает 5—6 кВт (в дальнейшем предполагается рост мощностей этих приборов).

Опыт эксплуатации городских сетей НН показывает, что наличие большого количества однофазных приемников приводит к существенной несимметрии нагрузок отдельных фаз этих сетей. Значительное различие нагрузок отдельных фаз особенно характерно для жилых зданий с электроплитами. Наличие несимметрии нагрузок фаз обуславливает появление токов I_0 и напряжений U_0 нулевой последовательности. (Некоторую роль играет напряжение U_2 обратной последовательности, однако его влиянием на режим работы сети и электроприемников в рассматриваемых условиях можно пренебречь.) В результате в сети возникают дополнительные потери мощности и энергии и потери напряжения, что отрицательно влияет на режим работы электроприемников и технико-экономические показатели работы сети. Основное влияние на режим работы однофазных приемников оказывает смещение нейтрали напряжений вследствие наличия напряжения нулевой последовательности U_0 .

Различие нагрузок фаз сети объясняется двумя основными причинами: а) вероятностной несимметрией нагрузок, вызванной случайными обстоятельствами, и б) неслучайной несимметрией, обусловленной неравномерным присоединением однофазных приемников к трехфазной сети. Принципиально неслучайная несимметрия при эксплуатации сети должна сводиться к относительно небольшой величине за счет систематического выравнивания нагрузок фаз персоналом. Вероятностная несимметрия является постоянно действующим фактором в нормальных режимах работы городских сетей

¹ В сетях с коммунально-бытовой нагрузкой однофазные нагрузки большой мощности практически отсутствуют, поэтому здесь рассматривается только вопрос относительно несимметрии напряжений в сетях НН.

НН, что необходимо учитывать при их проектировании. Предельные значения возможной несимметрии нагрузок фаз должны оцениваться на основании соответствующих статистических исследований.

При количественной оценке несимметрии напряжений в четырехпроводных городских сетях НН определенные затруднения вызывает отсутствие в ГОСТ четко фиксированных значений технических показателей, характеризующих допустимость практически возникающей несимметрии напряжений. Исследования показывают, что для приближенной оценки возможной несимметрии напряжений в этих случаях целесообразно определять вероятностные значения U_0 [Л. 11].

В первом приближении можно принять, что при напряжении $U_0 < (1 \div 2\%)$ режим напряжений в сети НН может считаться приемлемым. При $U_0 > (2 \div 3\%)$ обязательно должны быть приняты меры по его снижению. Значение U_0 зависит от тока I_0 и сопротивления Z_0 в схеме замещения нулевой последовательности (см. приложение 3) на соответствующих участках сети. Значения сопротивления Z_0 достаточно большие. Например, для воздушной линии сети НН активное сопротивление r_0 в 4 и более раз превышает соответствующее сопротивление для прямой последовательности. Для распределительных трансформаторов с соединением обмоток Y/Y_0 отношение полных сопротивлений нулевой и прямой последовательностей составляет в среднем 8 при медных и 9—15 при алюминиевых обмотках. Для трансформаторов с соединением обмоток Y/Z_0 сопротивление нулевой последовательности значительно меньше сопротивления прямой последовательности.

В ряде публикаций [Л. 8, 9 и др.] предлагается учитывать несимметрию нагрузок фаз путем увеличения потери напряжения в наиболее загруженной фазе. Соответствующие статистические данные приведены для сельских сетей [Л. 8] и городских сетей НН в районах с малой плотностью нагрузки [Л. 9]. В настоящее время исследование несимметрии напряжений в городских сетях ведется в МНИИТЭП [Л. 13].

При проектировании городских сетей НН несимметрию необходимо учитывать при выборе сечений линий, мощности и схемы соединений распределительных трансформаторов, при определении значений потерь напряжения на участках сети. Если показатели несимметрии напряжения оказываются недопустимыми, то необходимо принимать соответствующие меры по ее снижению. К числу их относятся: увеличение сечений проводов (в первую очередь нулевого провода), изменение схемы соединений распределительных трансформаторов, изменение схемы сети (например, уменьшение радиуса действия трансформатора, применение замкнутых или полузамкнутых схем сетей НН), установка специальных симметрирующих аппаратов (например, нейтралеров) на отдельных участках сети с наиболее неблагоприятными показателями несимметрии напряжений и т. п.

В условиях эксплуатации городских сетей очень важно организовать тщательный контроль за возможной несимметрией напряжения. При этом

необходимо иметь в виду, что несимметрия является местным показателем качества электрической энергии. Поэтому может потребоваться проведение измерений соответствующих показателей в различных пунктах сети. Для снижения несимметрии напряжения могут применяться: выравнивание нагрузок фаз на участках сети, изменение схем сети (например, осуществление работы петлевых схем сети НН в замкнутом режиме через предохранители с малыми номинальными токами), в отдельных случаях установка дополнительных симметрирующих аппаратов.

Приложение 1. Графо-аналитический метод определения мощности однофазных конденсаторов, используемых для симметрирования напряжений в промышленной сети.

На рис. 1 представлена схема участка трехпроводной трехфазной сети, к которой присоединены однофазные нагрузки \dot{S}_{ab} , \dot{S}_{bc} и \dot{S}_{ca} , мощности которых неодинаковы. Неодинаковыми будут и токи нагрузок \dot{I}_{ab} , \dot{I}_{bc} , \dot{I}_{ca} и токи в фазах сети \dot{I}_a , \dot{I}_b и \dot{I}_c . Несимметрия нагрузок фаз сети обуславливает появление в них помимо тока прямой последовательности \dot{I}_1 также тока обратной последовательности \dot{I}_2 . Известно [Л. 5], что

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{1}{3} (\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c); \\ \dot{I}_2 &= \frac{1}{3} (\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c). \end{aligned} \right\} \quad (\text{П-1})$$

Предположим, что вектор междуфазного напряжения \dot{U}_{ab} совмещен с вещественной осью, и запишем значение мощности прямой последовательности $\dot{S}_1 = \dot{I}_1 \dot{U}_1$ и условное значение мощности для обратной последовательности $\dot{S}_2 = \dot{I}_2 \dot{U}_1$, где \dot{U}_1 — напряжение прямой последовательности; при $\dot{U}_2 \ll \dot{U}_1$, $\dot{U}_1 \approx \frac{U_{ab}}{\sqrt{3}} \approx \frac{U_n}{\sqrt{3}}$. В выражении для \dot{S}_2 величина \dot{U}_1 играет роль коэффициента.

Используем следующие соотношения. Токи в фазах сети: $\dot{I}_a = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}$, $\dot{I}_b = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}$, $\dot{I}_c = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}$;

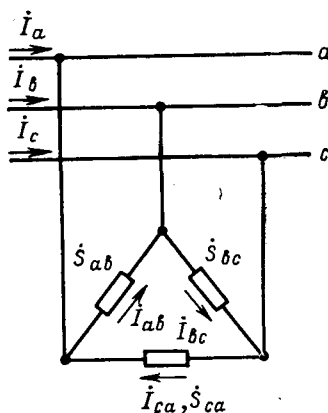


Рис. 1. Схема участка трехфазной трехпроводной сети.

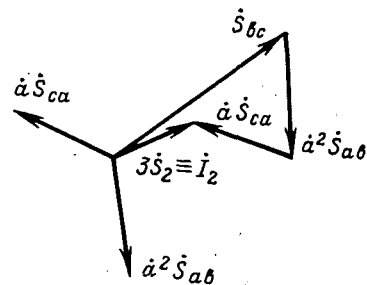


Рис. 2. Определение условной мощности \dot{S}_2 , пропорциональной току обратной последовательности \dot{I}_2 .

токи } нагрузок: $I_{ab} = \hat{S}_{ab}/\hat{U}_{ab}$; $I_{bc} = \hat{S}_{bc}/\hat{U}_{bc}$; $I_{ca} = \hat{S}_{ca}/\hat{U}_{ca}$; междофазные напряжения: $\hat{U}_{ab} = a\hat{U}_{bc} = a^2\hat{U}_{ca}$; $\hat{U}_{bc} = a^2\hat{U}_{ab}$; $\hat{U}_{ca} = a\hat{U}_{ab}$.

Подставляя их в (П-1), после преобразований получаем выражения:

$$\left. \begin{aligned} \dot{S}_1 = \hat{I}_1 \hat{U}_1 &= \frac{1}{3} (\dot{S}_{ab} + \dot{S}_{bc} + \dot{S}_{ca}); \\ \dot{S}_2 = \hat{I}_2 \hat{U}_2 &= \frac{1}{3} (a^2 \dot{S}_{ab} + \dot{S}_{bc} + a \dot{S}_{ca}). \end{aligned} \right\} \quad (\text{П-2})$$

Для симметрирования параметров режима могут быть использованы однофазные конденсаторы, установленные для компенсации реактивной мощности и присоединенные между отдельными фазами сети: Q_{ab} , Q_{bc} , Q_{ca} . При симметричной нагрузке сети эти мощности одинаковы. Для симметрирования режима при несимметричных нагрузках фаз однофазные конденсаторы должны быть включены между фазами таким образом, чтобы скомпенсировать ток обратной последовательности \dot{I}_2 или пропорциональную ему условную мощность \dot{S}_2 [см. (П-2) и рис. 2]. При этом должно выполняться условие

$$\frac{1}{3} (a^2 Q_{ab} + Q_{bc} + a Q_{ca}) = -\dot{S}_2. \quad (\text{П-3})$$

Для определения искомых значений Q_{ab} , Q_{bc} и Q_{ca} производим графическое построение в осях Q_{bc} ; $a^2 Q_{ab}$ и $a Q_{ca}$ (рис. 3). Задавшись значением Q'_{bc} (отрезок oa), откладываем его по соответствующей оси координат. Из конца вектора Q'_{bc} проводим линию, параллельную оси $a^2 Q_{ab}$, а из конца вектора $3\dot{S}_2$ — линию, параллельную оси $a Q_{ca}$. При пересечении этих линий в точке b отрезки ab и bc дадут в определенном масштабе искомые значения мощностей конденсаторов: Q'_{ab} и Q'_{ca} соответственно.

Задаваясь величиной Q''_{bc} (отрезок od), можно аналогично получить значения Q''_{ab} (отрезок de) и Q''_{ca} (отрезок ce). При этом суммарная мощность конденсаторов $Q''_{\Sigma} = Q''_{ab} + Q''_{bc} + Q''_{ca}$ меньше, чем в предыдущем случае ($Q''_{\Sigma} < Q'_{\Sigma} = Q'_{ab} + Q'_{bc} + Q'_{ca}$). Наименьшая суммарная мощность конденсаторов Q'''_{Σ} получится в том случае, когда

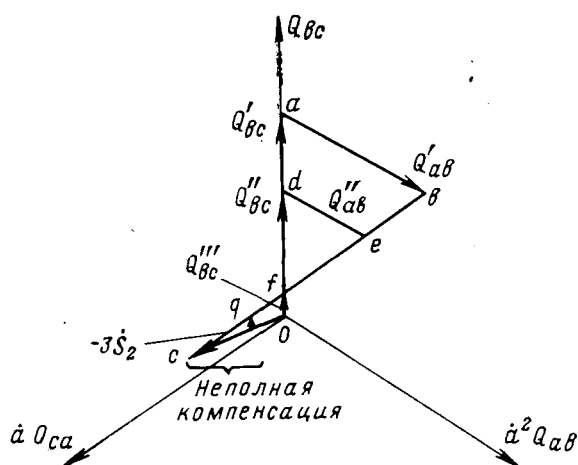


Рис. 3. Определение мощностей однофазных конденсаторов для симметрирования режима.

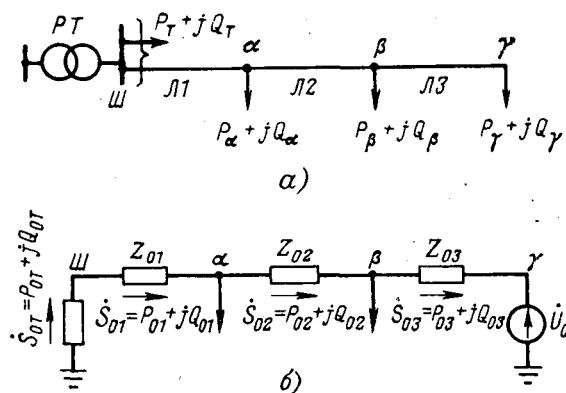


Рис. 4. Принципиальная схема (а) и схема замещения (б) распределительной сети низкого напряжения для определения напряжения нулевой последовательности \dot{U}_0 .

$Q'''_{ab} = 0$. При этом Q'''_{bc} отражается отрезком of , а Q'''_{ca} — отрезком fc : $Q'''_{\Sigma} = Q'''_{ab} + Q'''_{ca} = \min$.

Во всех рассмотренных случаях с помощью конденсаторов была обеспечена полная компенсация тока \dot{I}_2 и, следовательно, полное симметрирование несимметричной нагрузки. Если имеющейся в распоряжении мощности конденсаторов (предназначенной для компенсации реактивной мощности) недостаточно для полного симметрирования нагрузки, то может быть произведено неполное ее симметрирование. При этом \dot{S}_2 компенсируется неполностью.

На рис. 3 показан случай $-Q'_{bc}$ (отрезок gi), $Q^{IV}_{ab} = 0$ и Q^{IV}_{ca} (отрезок cg), когда компенсируется лишь часть мощности \dot{S}_2 (отрезок ci), а отрезок oi остается некомпенсированным.

Приложение 2. Приближенный способ симметрирования режима с помощью однофазных нагрузок.

Допустим, что от трехфазной сети (рис. 1) питаются однофазные нагрузки неодинаковой мощности. Необходимо присоединить их таким образом, чтобы получить наименьшую возможную несимметрию нагрузок фаз этой сети. Иначе говоря, желательно, чтобы ток обратной последовательности в сети был по возможности мал или равен нулю. Рассмотрим приближенный способ симметрирования этих нагрузок.

Предположим, что каждая из нагрузок состоит из ветвей 1, 2 и 0. Токи ветвей 1 одинаковы между собой, они вызывают протекание в сети токов прямой последовательности \dot{I}_1 (и мощностей \dot{S}_1). Токи ветвей 2 вызывают в сети токи обратной последовательности, и для обеспечения заданного условия они должны быть равны нулю. Токи ветвей 0 (и соответствующие им условные значения мощностей \dot{S}_0) могут быть любыми, так как при соединении нагрузок по схеме треугольника они не попадают в сеть.

Обозначим мощности нагрузок, присоединенных между фазами, \dot{S}_{ab} , \dot{S}_{bc} , \dot{S}_{ca} . Очевидно, что $\dot{S}_{ab} + \dot{S}_{bc} + \dot{S}_{ca} = \dot{S}_{\Sigma}$. Мощность ветвей 1 (прямой последовательности) для каждой нагрузки определяется из (П-2) (см. приложение 1): $\dot{S}_1 = 1/3 (\dot{S}_{\Sigma})$.

Задаемся значением мощности нагрузки \dot{S}_{bc} и находим $\dot{S}_0 = \dot{S}_{bc} - \dot{S}_1$, и с учетом (П-2) — значения мощностей нагрузок, которые должны быть присоединены между другими фазами: $\dot{S}_{ab} = \dot{S}_1 + a^2 \dot{S}_0$ и $\dot{S}_{ca} = \dot{S}_1 + a \dot{S}_0$. На основании полученных значений \dot{S}_{ab} , \dot{S}_{bc} и \dot{S}_{ca} должны группироваться мощности имеющихся фактически однофазных нагрузок.

Приложение 3. Определение напряжения нулевой последовательности U_0 при несимметричной нагрузке фаз в трехфазной четырехпроводной сети НН.

На рис. 4 представлена принципиальная схема сети, состоящей из распределительного трансформатора и трех участков линий НН (рис. 4,а) и схема ее замещения для определения U_0 (рис. 4,б). Трансформатор и линии представлены в схеме замещения сопротивлениями нулевой последовательности: $Z_{0т}$, Z_{01} , Z_{02} , Z_{03} . В узлах α , β и γ заданы мощности нагрузки для каждой фазы (для простоты на рис. 4,а указаны только суммарные мощности нагрузок всех трех фаз), на основании которых определяются нагрузки фаз на каждом участке сети.

При несимметричной нагрузке фаз \dot{S}_a , \dot{S}_b , \dot{S}_c в сети протекает ток нулевой последовательности \dot{I}_0 и соответствующее ему условное значение мощности нулевой последовательности \dot{S}_0 [вывод выражения для \dot{S}_0 аналогичен выводу для мощности \dot{S}_2 в приложении 2 — выражение (П-2)]:

$$\dot{S}_0 = \hat{I}_0 \dot{U}_1 = \hat{I}_0 \dot{U}_a \approx \hat{I}_0 \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \frac{1}{3} (\dot{S}_a + a \dot{S}_b + a^2 \dot{S}_c). \quad (\text{П-4})$$

Значения мощности \dot{S}_{0i} для каждого участка сети и трансформатора, определенные по [П-4], указаны на схеме рис. 4,б. По известным значениям \dot{S}_{0i} и Z_{0i} определяется наибольшее значение $\dot{U}_{0нб}$ в данной сети:

$$\dot{U}_{0нб} = \frac{1}{U_{ф.н}} \left(\dot{S}_{0т} Z_{0т} + \sum_{i=1}^3 \dot{S}_{0i} Z_{0i} \right) \quad (\text{П-5})$$

и его продольная составляющая

$$U'_{0нб} = \frac{1}{U_{ф.н}} \left[P_{0т} R_{0т} + Q_{0т} X_{0т} + \sum_{i=1}^3 (P_{0i} R_{0i} + Q_{0i} X_{0i}) \right]. \quad (\text{П-5а})$$

Поперечная составляющая $U''_{0нб}$ может быть определена аналогично.

Модуль $U_{0нб}$

$$|U_{0нб}| = \sqrt{(U'_{0нб})^2 + (U''_{0нб})^2} \quad (\text{П-6})$$

и в процентах:

$$\dot{U}_{0нб\%} = \frac{U_{0нб}}{U_{ф.н}} 100. \quad (\text{П-6а})$$

Выражения для \dot{S}_0 и $\dot{U}_{0нб}$ приведены выше для случая детерминированного задания нагрузок. Аналогичные выражения при вероятностном задании нагрузок даны в [Л. 11].

Выводы. 1. Наличие несимметрии напряжений и токов в распределительных сетях значительно

ухудшает технические и экономические показатели работы этих сетей. При их проектировании и эксплуатации должны предусматриваться соответствующие мероприятия по обеспечению допустимых показателей несимметрии: в промышленных сетях — напряжения обратной последовательности U_2 (регламентировано ГОСТ); в четырехпроводных трехфазных сетях НН в районах с коммунально-бытовой нагрузкой в качестве показателя несимметрии напряжений может быть предложено значение напряжения нулевой последовательности U_0 . Если $U_0 > (2-3)\%$, то должны быть приняты меры по симметрированию режима напряжений в сети.

2. В промышленных сетях для симметрирования параметров режима могут использоваться батареи однофазных конденсаторов, устанавливаемые для компенсации реактивной мощности (в приложении 1 приведен упрощенный графо-аналитический метод определения их параметров), а также дополнительные симметрирующие устройства. Должны быть проведены исследования по выяснению целесообразности областей применения устройств различных типов.

3. В городских сетях НН для снижения несимметрии напряжений при их проектировании могут быть использованы следующие средства: увеличение сечения нулевого провода линий, изменение схемы соединений обмоток трансформаторов, изменение схемы сети, уменьшение протяженности линий. В условиях эксплуатации должен быть организован тщательный контроль за несимметрией напряжений и в случае необходимости должны приниматься меры для ее снижения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мельников Н. А., Солдаткина Л. А. Учет качества электрической энергии в промышленных сетях. VII Всемирная конференция по промышленной энергетике. Доклад 14, Проблема V. Киев, 1972.
2. Шидловский А. К., Кузнецов В. Г., Москаленко Г. А. Симметрирование и компенсация реактивной мощности в сетях с мощными однофазными нагрузками. — В сб.: Тезисы докладов на III Всесоюзном совещании по качеству электрической энергии. М., Изд. ЭНИН, 1973, с. 80—83.
3. Гитгарц Д. А., Мнухин Л. А. Симметрирование трехфазной сети при питании однофазных электротермических установок. М., Информэлектро, 1969, 60 с.
4. Железко Ю. С., Мельников Н. А., Солдаткина Л. А. Влияние различных факторов на погрешности определения емкостных проводимостей воздушных линий сверхвысокого напряжения. — «Электричество», 1972 № 3, с. 5—10.
5. Мельников Н. А. Электрические сети и системы. М., «Энергия», 1969, 456 с.
6. Нормы качества электрической энергии у ее приемников, присоединенных к электрическим сетям общего назначения. ГОСТ 13109-67, М., Изд.-во стандартов, 1967, 12 с.
7. Милых А. Н., Шидловский А. К., Кузнецов В. Г. Схемы симметрирования однофазных нагрузок в трехфазных цепях. Киев, «Наукова думка», 1973, 219 с.
8. Левин М. С., Мурадян А. Е. Несимметрия нагрузок в сельских электрических сетях низкого напряжения и ее влияние на качество напряжения. Доклады на Всесоюзной конференции по качеству напряжения и его регулированию в электрических сетях и системах. М., Изд. ЭНИН, 1961, с. 267—276.
9. Тушина А. А. Несимметрия напряжений в городских распределительных сетях низкого напряжения. Доклады на Всесоюзной конференции по качеству напряжения и его регулированию в электрических сетях и системах. Изд. ЭНИН, 1961, с. 277—290.
10. Мельников Н. А., Солдаткина Л. А. Возможности симметрирования режима однофазными нагрузками. — «Труды

Смоленского филиала МЭИ. Электрические системы», вып. 2. Смоленск, 1973, с. 54—63.

11. Солдаткина Л. А. Учет несимметрии напряжений при проектировании городских электрических сетей.— В сб.: Опыт проектирования систем электроснабжения городов. Л., «Энергия», 1973, с. 71—75.

12. Мельников Н. А., Солдаткина Л. А. Метод расчета режимов обратной последовательности в распределительных

сетях с несимметричными нагрузками.— «Труды Московского энергетического института. Электрические системы и сети», вып. 133, 1972, с. 121—126.

13. Тушина А. А. Оценка асимметрии, возникающей в городских сетях, и мероприятия по ее снижению. Тезисы докладов на III Всесоюзном совещании по качеству электрической энергии. М., Изд. ЭНИН, 1973, с. 133.

[5.8.1974]

УДК 621.311:658.562:62.012.45

Информационное обеспечение процесса управления качеством электроэнергии

МАРКУШЕВИЧ Н. С.

Рига

Качество электроэнергии характеризуется совокупностью показателей, регламентированных ГОСТ 13109-67. В свою очередь, само качество электроэнергии является одной из характеристик режима работы электрической сети энергосистемы и тесно связано с другими важнейшими характеристиками режима: надежностью и экономичностью производства, передачи и распределения электроэнергии. Каждая характеристика режима в отдельности, тем более режим электроснабжения в целом, является сложным объектом управления. Как известно, для успешного управления сложным объектом необходима достаточная информация об этом объекте. Достаточная информация состоит из минимума сведений, необходимых для управления, а вовсе не из всей информации, которую можно получить о данном объекте управления [Л. 1]. В нашей задаче достаточной можно считать такую информацию, которая позволяет получить ответы на следующие вопросы:

соответствует ли качество энергии в данном режиме требуемому (задача контроля);

в чем возможные причины отличия качества электроэнергии от требуемого;

какие мероприятия могут быть проведены для введения качества электроэнергии в допустимую область;

каким будет эффект после осуществления тех или иных из выбранных мероприятий (прогноз качества).

Последние три вопроса относятся к задаче анализа качества электроэнергии. Задачи контроля и анализа электроэнергии тесно переплетаются, что объясняется тем, что контроль качества электроэнергии является практической проверкой внедренных результатов анализа, а анализ качества электроэнергии начинается с результатов контроля. Методики и средства информационного обеспечения процесса управления качеством электроэнергии должны основываться на специфике самой задачи и на реальных возможностях затрат живого труда в электросетевых предприятиях.

В процессе управления качеством электроэнергии значительное место занимает персонал, в функции которого входит получение и обработка информации и принятие решений об управляющих воздействиях. При этом персонал производит обработку двух видов информации: первичной, получен-

ной непосредственно из измерений, и априорной, хранящейся у самого персонала (статистика, профессиональные знания работника, техническая, директивная и договорная документация и т. д.). Совокупность априорной информации и способности приемника воспринимать сообщения об управляемом объекте называют тезаурусом приемника¹ информации [Л. 2—4].

Под способностью восприятия сообщения мы понимаем наличие возможности обработки поступающих сообщений для целенаправленного управления. Чем большей априорной информацией и чем большими возможностями по ее обработке располагает персонал, тем меньше требуется первичной информации. Строго говоря, выбор соотношения между объемом первичной информации и развитостью тезауруса должен осуществляться на основе технико-экономических оценок с учетом реальных возможностей электросетевых предприятий по трудозатратам.

Информация передается в виде сообщений. Сообщение характеризуется собственным объемом и количеством несомой им информации. Объем сообщения может измеряться количеством знаков, чисел или слов, из которых оно состоит. Количество информации в сообщении может измеряться возможной степенью изменения тезауруса при восприятии данного сообщения [Л. 2].

Не всякая информация, изменяющая тезаурус, может быть использована для достижения стоящей перед персоналом цели. В этом смысле важно, чтобы персонал получал целесообразную информацию. За меру целесообразности предлагают принимать изменение вероятности достижения цели при получении дополнительной информации [Л. 5]. Передача одинаковой информации в сообщении меньшего объема называется сжатием информации [Л. 6 и 7]. Сжатие информации позволяет сократить трудозатраты на получение, передачу и обработку информации. Большое значение при организации системы сбора, передачи и обработки информации о режиме сети имеет выбор средств измерения первичной информации (источников информации). Источники информации (приборы) должны обеспечить сбор достаточной целесообразной и достоверной информации при малых затратах труда персонала. В за-

¹ В нашем случае приемником (получателем) информации является персонал.

даче управления качеством электроэнергии современным решением вопроса является применение переносных приборов, производящих автоматическое измерение показателей режима, сжатие и длительное хранение первичной информации.

Таким образом, информационный аспект проблемы управления качеством состоит из следующих основных задач:

- выбор достаточной целесообразной первичной информации для данного показателя качества;
- выбор методов сжатия информации;
- выбор источников информации;
- выбор количества априорной информации персонала, методов и средств хранения и переработки информации для принятия решений об управляющих воздействиях (развитость тезауруса приемника информации).

Все названные выше задачи взаимосвязаны.

Выбор необходимой (достаточной и целесообразной) первичной информации. Качество электроэнергии в конечном счете проявляется на зажимах электроприемников (ЭП). Получение информации о качестве электроэнергии на зажимах каждого ЭП неосуществимо, да и нецелесообразно. Правильное решение об управляющем воздействии может быть принято на основании информации, полученной из небольшого числа точек измерения в данной электрической сети. Эти точки измерения принято называть контрольными. Информация из некоторой дополнительной точки, не приводящая к изменению вероятности принятия правильного решения, нецелесообразна. В качестве контрольных точек обычно выбирают нагрузочные узлы распределительной сети, характеризующиеся крайними относительно допустимой области значениями показателей качества электроэнергии.

Для получения достаточной и устойчивой информации измерения в контрольных точках должны проводиться достаточно длительное время, охватывающее основные характерные режимы данного периода. Конкретный выбор места, времени и объема измерений зависит от исследуемого показателя качества, имеющихся средств и методов для получения и обработки информации.

Длительная фиксация большого числа измерений традиционным способом с помощью указывающих приборов и записей персонала требует большой затраты труда, приводит к сообщениям большого объема, усложняет обработку и анализ информации, снижает ее достоверность. В связи с этим необходимо сжатие информации.

Сжатие информации на основе вероятностно-статистических методов. В общем случае показатели качества электроэнергии представляют собой функции времени, состоящие из случайной и неслучайной составляющей [Л. 1]. В частности, одна из составляющих может отсутствовать. Методика применения статистических характеристик должна быть ориентирована на все случаи. Применение тех или иных статистических характеристик зависит от свойств показателя качества энергии, от поставленной задачи. Статистические характеристики могут быть условно разделены на интегральные и на характеристики в сечениях. В первом случае речь идет о характеристиках случайных величин, полученных при

замене случайной функции временной последовательностью случайных чисел (дискретизация по времени). Во втором случае имеем дело со случайными величинами, полученными в одинаковых сечениях по времени разных реализаций случайной функции. Эффективность применения интегральных характеристик зависит от вида показателя качества электроэнергии. Рассмотрим приложения этих характеристик к контролю и анализу отклонений напряжения.

Вероятность попадания в допустимый диапазон (ВПД). Это интегральная характеристика, введенная в ГОСТ 13109-67. Теоретически на основе ВПД можно ответить на вопрос о соответствии качества требуемому; на остальные три вопроса анализа отклонений напряжения ВПД ответа не дает. Практически же ВПД не дает ответа и на первый вопрос. Это объясняется тем, что любой измерительный прибор обладает погрешностью. В определении ВПД — это погрешность установки границ диапазонов. Даже малое значение этой погрешности может привести к большой неточности определения ВПД. Кроме того, эта характеристика в силу резкого изменения своего значения при незначительном дрейфе отклонения напряжения в области границ диапазона не обладает достаточной для прогнозирования стабильностью.

Математическое ожидание отклонения напряжения (МО). С помощью этой характеристики можно в отдельных случаях частично отвечать на поставленные вопросы. Совместное использование ВПД и МО дает несколько более полную информацию, однако недостаточную для ответа на все вопросы контроля и анализа. Таким образом МО может использоваться только как дополнительная характеристика. Устойчивость МО, необходимая для прогнозирования, намного выше, чем устойчивость ВПД.

Характеристики рассеяния отклонения напряжения — стандартные отклонения (СО) и среднее уклонение (СУ) сами по себе не дают ответов на все вопросы контроля и анализа качества напряжения. СО или СУ совместно с МО дают существенно более полную информацию. Тем не менее они не позволяют получить достаточную информацию, необходимую для контроля и анализа качества. В то же время характеристики рассеяния обладают замечательным свойством: между их величиной и шириной диапазона, вероятностью попадания в который близка к единице, существует достаточно однозначное соответствие для различного класса кривых распределения отклонений напряжения [Л. 8]. Интегральные характеристики рассеяния, полученные за период достаточной длительности (несколько суток), обладают необходимой устойчивостью и могут быть распространены на перспективу.

Плотность распределения. Гистограмма. Наиболее полной интегральной характеристикой качества напряжения является плотность распределения отклонений напряжения, представляемая обычно в условиях эксплуатации в виде гистограммы. Зная гистограмму и используя априорные знания персонала, можно дать исчерпывающий ответ на все четыре вопроса контроля и анализа качества напряжения. На основе гистограммы легко рассчитываются все вышеуказанные характеристики. Точность определения этих характеристик по гистограмме достаточно высока, несмотря на возможность большой погрешности в определении вероятности попадания в отдельные разряды гистограммы.

При контроле и анализе режима напряжений как в низковольтной, так и в распределительной сети среднего напряжения обычно рассматривается не одна гистограмма и ее числовые характеристики, а совокупность нескольких гистограмм и их числовых характеристик. Полная информация получается на основе сопоставления гистограмм, измеренных в различных точках сети, в разные характерные периоды времени определенной длительности. В отдельных случаях эта информация требует дополнения в виде априорных знаний обслуживающего персонала или в виде статистических характеристик отклонения напряжения в сечениях суточных реализаций. Обычно бывает достаточно в последнем случае знание математического ожидания отклонения напряжения в характерные периоды времени.

Таким образом, на основе совокупности гистограмм и их числовых характеристик, измеренных в контрольных точках за периоды с достаточной длительностью (сутки, неделя), мо-

жет быть осуществлен контроль и анализ режима напряжений распределительной сети без существенного увеличения затрат живого труда.

Для других показателей качества электроэнергии (несинусоидальность, несимметрия) применение гистограммы менее эффективно. Это связано со специфическими особенностями этих показателей. Несинусоидальность должна характеризоваться различным образом в зависимости от задачи контроля и анализа (действующим значением суммы высших гармоник, составом гармоник или формой кривой). Первая из этих характеристик регламентируется ГОСТ 13109-67 и может служить критерием контроля качества, но для анализа и принятия решений информация, несомая этой характеристикой, недостаточна.

Также недостаточна для управления качеством напряжения информация, несомая обобщенными показателями несимметрии: смещением нейтрали и напряжением обратной последовательности. Более того, так как в ГОСТ 13109-67 допустимые значения этих показателей поставлены в зависимость от одновременных значений других показателей качества и режима, они не дают достаточной информации даже для контроля качества напряжения. Эти обстоятельства усложняют методику и средства получения информации о несинусоидальности и несимметрии.

Методы сжатия информации о несинусоидальности напряжения в настоящее время могут быть сведены к выбору достаточно простых характеристик этого показателя и к выявлению времени и места наибольшего проявления несинусоидальности посредством автоматической регистрации этой характеристики. Только после этого при необходимости во времени наибольшего проявления несинусоидальности с помощью более сложных средств производится получение достаточной, целесообразной информации.

При контроле и анализе несимметрии в некоторых случаях может быть использована информация в виде математических ожиданий (МО) трех фазных (междуфазных) напряжений и МО смещения нейтрали (напряжения обратной последовательности). По сопоставлению этих характеристик можно судить о наличии и значении случайной и неслучайной составляющих несимметрии. В данном случае это существенно, так как от этого зависит выбор мероприятий по снижению несимметрии. Учитывая тесную взаимосвязь несимметрии с отклонениями фазных (междуфазных) напряжений в ряде случаев достаточная информация может быть получена на основании измерений МО каждого фазного (междуфазного) отклонения напряжения в нескольких сечениях суточной реализации. Выбор сечений (времени измерения) также может быть осуществлен на основе предварительного выявления времени наибольшего проявления несимметрии с помощью автоматической регистрации обобщенных показателей несимметрии.

Колебания напряжения, несимметрия и несинусоидальность напряжения в сетях с резкопеременной нагрузкой выделяются в настоящее время в специфическую область качества электроэнергии, в которой требуются специальные методы исследования случайных процессов.

Аппаратура для получения первичной информации о качестве электроэнергии. Для определения отклонений напряжения наиболее приемлемым прибором следует считать статистический анализатор качества напряжения (САКН) [Л. 9]. С помощью прибора САКН определяется гистограмма отклонений напряжения, по данным которой рассчитываются ее числовые характеристики. Выпускаемый в настоящее время прибор САКН обладает основной погрешностью установки диапазона измерения $\pm 1\%$ измеряемого напряжения и погрешностью установки границ разрядов — $\pm 0,25\%$. При прочих равных условиях однозначность информации, получаемой с помощью прибора САКН, зависит в некоторой степени от частотных свойств исследуемого процесса и формы кривой распределения.

В задачах регулирования напряжения в сетях общего назначения информация, относящаяся к сравнительно высокочастотным свойствам процесса изменения напряжения, приближающихся к колебани-

ям напряжения, участия не принимает. Такая информация избыточна и, следовательно, ее отсутствие в данном случае не снижает целесообразной достоверности гистограммы. Поэтому обычно принимаемый при установке прибора САКН период опроса в одну минуту удовлетворяет поставленной задаче. Фактически выпускаемый в настоящее время САКН позволяет изменять выдержку времени от 10 сек до 3 мин.

Другая составляющая возможной неоднозначности гистограмм вызывается пересечением границами разрядов гистограммы крутых фронтов кривой распределения отклонений напряжения. В этом случае даже малая погрешность в установке границ разрядов гистограммы может вызывать значительное отличие в значениях вероятностей попадания в соседние разряды. Поэтому наблюдаются случаи, когда несколько приборов САКН, включенных в одну точку электросети на одно и то же время, показывают различающиеся между собой гистограммы. Это различие в основном заключается в некотором перераспределении значений вероятности попадания в соседние разряды. Однако это не говорит о том, что информация, полученная с помощью прибора САКН, недостоверна. Некоторое перераспределение значений вероятностей попадания в соседние разряды незначительно сказывается на значениях числовых характеристик гистограммы, на ее общем характере и диапазоне распространения.

Проведенные эксперименты в реальных условиях показали, что различные вероятности попадания в отдельные разряды, достигающие 20% относительно суммы вероятностей по всем разрядам, не приводит к погрешностям в определении математического ожидания более $\pm 1\%$ и в определении стандартного отклонения более $\pm 0,15\%$. Таким образом, при пользовании информацией, полученной с помощью прибора САКН, необходимо привлекать всю совокупность характеристик, даваемых этим прибором: форму гистограммы, вероятности попадания в различные разряды, числовые характеристики. Снижение погрешности определения математического ожидания возможно при увеличении точности установки всего диапазона измерения. Можно считать целесообразным уменьшение основной погрешности прибора до 0,5%.

Эффективность использования информации, получаемой с помощью прибора САКН, в значительной мере увеличивается при использовании совокупности гистограмм, измеренных в разное время недели и в разных контрольных точках сети с максимальным привлечением априорной информации персонала о режиме и схеме сети и его возможностей преобразования информации.

В ряде случаев при недостаточном богатстве тезауруса приемника информации требуется дополнительная первичная информация в виде характеристик отклонения напряжения в сечениях суточной реализации. Такая информация может быть получена с помощью прибора типа СИГН [статистический измеритель графика напряжения (нагрузки)]. В общем случае характеристиками в сечениях могут быть МО на участке стационарности в течение нескольких однотипных суток, СО или СУ напряжения за тот же период.

Наиболее просто такой прибор может быть выполнен для определения МО в заданное время [Л. 10]. Определение характеристики рассеяния СО на основе квадратичного преобразования отклонения напряжения более сложно: требуется исключительно высокая точность преобразования. Это объясняется тем, что дисперсия является малой разностью больших величин — второго начального момента и квадрата МО. Учитывая, что СО представляет собой обычно единицы процентов, точность определения исходных величин должна характеризоваться погрешностью в десятые доли процентов, что технически трудно осуществимо в приборах, предназначенных для массового применения в электрических сетях. В [Л. 11 и 12] показано, что при использовании в качестве характеристики рассеяния отклонений напряжения значения СУ может быть построен прибор на основе линейного преобразования отклонения напряжения в частоту следования импульсов для одновременного измерения МО и СУ. Как для получения МО, так и для получения характеристик рассеяния основным элементом, определяющим точность преобразования, является преобразователь напряжения в частоту следования импульсов [Л. 10].

В ряде случаев при контроле и анализе качества напряжения, при выборе и контроле закона регулирования напряжения местными и централизованными средствами может потребоваться выявление статистической взаимосвязи между двумя величинами, например, между напряжением и током. Для решения этих вопросов достаточной информацией является двумерная плотность распределения измеряемых величин или корреляционная таблица [Л. 13]. Измерение корреляционной таблицы может быть осуществлено с помощью прибора, выполненного по принципу статистического анализатора двух величин [Л. 14].

Опыт показывает, что для анализа качества напряжения во всей распределительной сети среднего напряжения, подключенной к одному центру питания, достаточно 5—8 приборов типа САКН и 1—2 прибора типа СИГН. Учитывая, что приборы типа САКН и СИГН переносные, с их помощью можно получить первичную информацию о качестве напряжения в течение характерного периода одного сезона для 5—6 центров питания.

Для определения показателей несимметрии специальные приборы в настоящее время не выпускаются. В городских электросетях практикуется 1—2 раза в год производить измерения всех фазных и междуфазных напряжений на шинах низкого напряжения распределительных трансформаторов с помощью показывающих вольтметров. Даже при использовании вольтметров сравнительно высокого класса представительность этой информации достаточно низка из-за неодновременности измерений, снятия мгновенных показаний и ошибок персонала. Тем не менее до оснащения электросетей современными средствами получения информации эти измерения должны продолжаться, а их результаты подвергаться анализу.

Некоторую информацию о несимметрии с автоматической фиксацией измерений можно получить, используя три прибора типа САКН, включаемые

для измерения трех фазных (междуфазных) напряжений. Однако это требует увеличения парка приборов типа САКН и трудозатрат для обработки результатов измерений. При этом не получается достаточной информации для управления несимметрией. Для измерения характеристик несимметрии может применяться прибор типа СИГН в трехфазном исполнении. С помощью такого прибора измеряются значения МО трех фазных (междуфазных) напряжений в заданных сечениях и значение МО смещения нейтрали (напряжения обратной последовательности) за весь период измерений. В этом случае получается информация о наличии, значении и связи несимметрии с отклонением напряжения в периоды ее наибольшего проявления, а также интегральная оценка обобщенного показателя несимметрии.

Наиболее полную информацию о режиме напряжения в трехфазной сети можно было бы получить от трехфазного измерительного прибора с достаточно частой фиксацией результатов измерения на машинный носитель информации, пригодный для ввода в ЦВМ. Таким носителем информации может быть, например, перфолента, получаемая от переносного перфоратора, на который воздействует аналого-цифровой преобразователь.

Как видим, получение необходимой информации о несимметрии напряжения требует громоздких измерений и достаточно сложных приборов. Поэтому для уменьшения объема измерений представляется целесообразным предварительное выявление места (на основе априорных знаний персонала) и времени наибольшего проявления несимметрии (с помощью регистрации смещения нейтрали или напряжения обратной последовательности). Измерение этих характеристик производится с помощью фильтров симметричных составляющих, требования к точности которых достаточно высоки. На выходе этих фильтров необходимо иметь регистрирующие приборы. При этом не требуется полной обработки регистрограммы. Необходимо только выявить наличие существенной несимметрии и время ее наибольшего проявления. После этого при необходимости может быть использован более сложный прибор для анализа качества напряжения.

Вид аппаратуры, применяемой для получения информации о несинусоидальности, зависит от задачи анализа. Так, для контроля соответствия несинусоидальности требованиям ГОСТ 13109-67 достаточно определить действующее значение суммы высших гармоник напряжения. Для выявления условий резонанса, определения потерь в обмотках электродвигателей и т. п. необходимо знать состав гармоник. Для оценки влияния несинусоидальности на потери в трансформаторах на погрешности измерительных и автоматических устройств необходимо знание характера формы кривой напряжения (заостренная или уплощенная по сравнению с синусоидой). Общим для всех случаев является выявление времени наибольшего проявления несинусоидальности. Последнее может быть осуществлено с помощью регистрации некоторой простой характеристики несинусоидальности.

Действующее значение суммы высших гармоник может быть определено с помощью измерителя не-

тнейных искажений, позволяющего измерить мгновенное значение показателя.

Для определения состава гармоник может быть использован анализатор гармоник. Это также достаточно сложный лабораторный прибор, с помощью которого можно последовательно определить мгновенные значения каждой гармоники. Фазовый сдвиг гармоник, а следовательно, форма кривой с помощью этого прибора не определяются.

Форма кривой напряжения может быть наиболее просто охарактеризована коэффициентом формы, коэффициентом амплитуды или коэффициентом среднего значения (отношение среднего напряжения к амплитудному). Для определения коэффициента среднего значения разработан и применяется в Латвийской энергосистеме регистрирующий прибор типа РИФ [Л. 15 и 16].

Таким образом, при постановке задачи контроля и анализа несинусоидальности следует ориентироваться на комбинацию различных средств измерения. Представляется целесообразным при отсутствии априорной информации о месте и времени существенных проявлений несинусоидальности производить ее предварительную индикацию с помощью простых регистрирующих приборов (например, типа РИФ) в течение достаточно длительного времени (неделя). После этого при необходимости следует проводить более подробный анализ несинусоидальности с помощью более сложных средств.

Передача и обработка первичной информации. Задача управления качеством электроэнергии разделяется на малые циклы автоматического управления и большие циклы автоматизированного управления. Малые циклы автоматического управления представляют собой автоматическое регулирование показателей качества электроэнергии с помощью автоматических устройств. В этом случае первичная информация собирается непосредственно измерительным органом автоматического устройства и обрабатывается логической частью этого устройства в соответствии с заложенным в него алгоритмом и законом регулирования. Здесь осуществляются непрерывные измерения, передача и обработка информации, а также выработка управляющих воздействий.

В большом цикле автоматизированного управления первичная информация передается персоналу, который с помощью тех или иных средств производит ее обработку и вырабатывает управляющие воздействия, заключающиеся, в частности, в изменении законов регулирования и алгоритмов действия регулирующих автоматов. В большом автоматизированном цикле управления качеством электроэнергии не требуются непрерывные измерения и очень быстрая передача информации. Это обстоятельство и позволяет использовать переносные приборы, осуществляющие автоматическое измерение и длительное запоминание результатов.

Обработка полученной информации персоналом зависит от стоящей перед ним задачи, имеющихся в его распоряжении методик и средств анализа подобной информации, а также возможностей по трудозатратам. В простейшем случае это умозрительный анализ измерений и выработка управляющего

воздействия в значительной степени на основании опыта работника.

Развитость априорной информации персонала и возможности по обработке информации (богатство тезауруса) в значительной степени влияет на эффективность использования результатов измерений. В этом отношении значительный эффект можно ожидать от применения ЦВМ для хранения и обработки информации о режиме распределительной сети.

Применение ЦВМ для обработки информации о качестве электроэнергии. Контроль и анализ качества электроэнергии является одной из задач проблемы управления режимом электрической сети и входит в числе других в автоматизированную систему управления режимами распределительных сетей (АСУ РРС) [Л. 17].

Системный подход к этой проблеме, основанный на применении ЦВМ, позволяет решать вопросы качества электроэнергии в комплексе с вопросами надежности и экономичности электроснабжения. АСУ РРС базируется на централизованном в масштабе энергосистемы массиве исходной информации о режимах и параметрах распределительных сетей. Исходная информация переносится персоналом сетевых предприятий с первичных документов на перфоленду в соответствии со специально разработанной инструкцией.

Подготовленная таким образом и проверенная информация передается по телетайпам в ВЦ энергосистемы. Здесь с помощью специальных программ приема, проверки и группировки информации полученные данные записываются во внешнюю память ЦВМ (на магнитную ленту и перфокарты). При этом происходит группировка информации по нескольким подмассивам и упорядочение внутри подмассивов. Имеются: подмассив связей (С), распределительных трансформаторов (Т), центров питания (ЦП) и измерений (И). В подмассиве С содержится информация о схеме сети, марках, длинах и сопротивлениях ЛЭП. В подмассиве Т — данные о параметрах РТ и их нагрузках. В подмассиве ЦП имеется информация о схеме ЦП, график нагрузок отходящих распределительных линий, диапазоне и законе регулирования напряжения и т. д. В подмассиве И хранятся результаты измерений нагрузок и напряжений, производимых периодически или эпизодически персоналом электросетей в ТП.

На основании информации, имеющейся в массиве исходной информации, производится расчет графиков нагрузки каждого РТ по разработанной в Латглавэнерго для ЦВМ-220 А программе комплексного расчета нагрузок (КОРН). В процессе работы программы КОРН происходит «уравновешивание» информации о нагрузках, заключающееся в соблюдении баланса нагрузок головного участка линии и нагрузок РТ, подключенных к данной линии. Далее производится расчет электрического режима распределительной сети по разработанной в Латглавэнерго программе ЦДС-8. Эта программа представляет собой математическую цифровую модель режима распределительной сети.

Результаты расчета по программе ЦДС-8 сравниваются с сопоставляемыми результатами измере-

ний, хранящимися в подмассиве И. Если имеются существенные расхождения, производится корректировка исходных данных и расчет по ЦДС-8 повторяется. Результатами расчета по программе ЦДС-8 являются потери активной и реактивной мощности в линиях 6, 10, 20 кВ и в распределительных трансформаторах за каждый час рабочих суток и за сутки в целом, графики нагрузки всех участков линий и РТ, графики напряжения на стороне ВН и НН РТ. По этим данным можно определить соответствие отклонений напряжения на шинах низкого напряжения РТ требуемым значениям провести анализ качества напряжения, внести изменения в закон регулирования напряжения в ЦП, изменить ответвления на РТ, схему сети и т. д.

Выбор этих мероприятий на основе результатов расчетов по ЦДС-8 может быть выполнен с помощью специальных программ, причем использование различных программ позволяет своевременно производить комплексную оптимизацию режима электрической сети.

В Центральной диспетчерской службе Латвглавэнерго применяются также программы для обработки результатов измерений, производимых персоналом сетей. К этим программам относятся расчет статистических характеристик отклонений напряжения (ЦДС-2), расчет однородности нагрузок линий (ЦДС-3), расчет несимметрии напряжений и токов (ЦДС-11) и др.

Программа ЦДС-2 на основе данных подмассива И рассчитывает и «вычерчивает» гистограмму отклонений напряжения за разные периоды измерения, рассчитывает вероятностные характеристики отклонений напряжения, проверяет правильность выбора диапазона измерений и исправность прибора САКН. Программа ЦДС-3 по данным подмассива ЦП рассчитывает взаимные коэффициенты корреляции между нагрузками различных линий, отходящих от данного ЦП, группирует линии по признаку однородности переменных частей графиков нагрузки (по значению взаимного коэффициента корреляции).

Программа ЦДС-11 по данным подмассива И рассчитывает значения напряжений обратной и нулевой последовательности, а также тока и сопротивления нулевой последовательности на шинах низкого напряжения РТ. Программа ЦДС-8 может быть использована также для определения колебаний напряжения на шинах ВН и НН РТ. Для этого необходимо вместо почасового графика нагрузок задать график нагрузки, составленный из чередующихся нормальных и толчковых активных и реактивных нагрузок.

Результаты расчетов по этим программам могут быть эффективно использованы для контроля и анализа качества электроэнергии. При этом измерения в сети нужны уже не столько для контроля и анализа режима, сколько для проверки достоверности математических цифровых моделей режима. В ряде случаев это сокращает необходимый объем аппаратного сбора информации о качестве напряжения. Применение ЦВМ на базе централизованного массива информации о режиме и схеме распределительной сети значительно увеличивает богатство тезауруса получателя информации.

Как уже указывалось выше, внедрение современных методов получения и обработки информации о качестве электроэнергии, эффективность использования этой информации в значительной степени зависят от уровня квалификации и информированности персонала электрических сетей.

Выводы. 1. Необходимы разработка и распространение среди персонала электросетей энергосистем, коммунальных, промышленных и сельскохозяйственных предприятий методических указаний по контролю и анализу качества напряжения. Эти методические указания должны быть ориентированы на получение достаточной, целесообразной информации с учетом реально осуществимых трудозатрат.

2. Электросетевые предприятия должны быть оснащены достаточным количеством современных приборов для контроля и анализа качества электроэнергии.

3. Использование ЦВМ в задаче управления режимом распределительной электросети должно быть основано на централизованном массиве исходной информации. Это в значительной степени увеличивает возможности персонала по хранению, обработке информации и принятию правильных решений для ведения режима сети.

4. Необходимо развитие представлений персонала электросетей о современных задачах, методах и средствах управления качеством электроэнергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веников В. А., Кенгерлинский Г. А. Информация в электроэнергетике. — В кн.: Информация и кибернетика. М., «Советское радио», 1967, с. 260—335.
2. Шрейдер Ю. А. О семантических аспектах теории информации. — В кн.: Информация и кибернетика. М., «Советское радио», 1967, с. 115—48.
3. Гришкин И. И. Понятие информации. М., «Наука», 1973, 229 с.
4. Темников Ф. А., Афонин В. А., Дмитриев В. И. Теоретические основы информационной техники. М., «Энергия», 1971, 423 с.
5. Харкевич А. А. О ценности информации. — «Проблемы кибернетики», вып. 4. М., Физматгиз, 1960.
6. Кляев Н. И. Информационные основы передачи сообщений. М., «Советское радио», 1966, 360 с.
7. Веников В. А. О задачах научно-теоретических разработок, связанных с проблемой АСУ ЕЭЭС СССР. — «АН СССР. Энергетика и транспорт», 1972, № 2, с. 22—23.
8. Маркушевич Н. С. Интегральные характеристики качества напряжения. — В кн.: Регулирование напряжения в электрических сетях. М., «Энергия», 1968, с. 82—92.
9. Баркан Я. Д., Маркушевич Н. С. Использование статистической информации о качестве напряжения в электрических сетях. М., «Энергия», 1972, 119 с.
10. Маркушевич Н. С., Крикет Д. Д. Измерение показателей режима электрической сети в сечениях суточных реализаций. — «Электричество», 1973, № 9, с. 73—76.
11. Маркушевич Н. С. Автоматизация статистического анализа качества напряжения. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Рига, 1966, 31 с.
12. Маркушевич Н. С. Определение характеристик распределения отклонений напряжения. — «Ученые записки Рижского политехнического института», т. XXVI «Электроэнергетика». Рига, «Зинатне», 1968, с. 199—204.
13. Маркушевич Н. С. Режимы и автоматизация электропитания промышленных предприятий. Ч. I. Режимы работы автоматически регулируемой конденсаторной батареи. Изд. Межотраслевого института повышения квалификации специалистов народного хозяйства Латвийской ССР. Рига. 1971, 59 с.
14. Баркан Я. Д., Маркушевич Н. С. Применение средств статистического анализа качества напряжения. — В кн.: Регулирование напряжения в электрических сетях. М., «Энергия», 1968, с. 92—104.

Контроль параметров режима электрической сети энергосистемы

Инж. БУРКОВ Ю. А., канд. техн. наук КАЗАНЦЕВ В. Н.

Свердловск

Для того чтобы оценить экономичность работы сети, проверить соответствие ее режима требованиям ГОСТ и других нормативных документов, получить информацию для корректировки режима или определения целесообразности изменения параметров сети, должна быть создана система контроля режима сети. Составной ее частью предполагается система контроля качества отпускаемой энергии, которая должна давать информацию об отклонениях от норм ГОСТ на качество электроэнергии у ее приемников.

Существующая путаница в требованиях к этим системам и соответственно к получаемой от них информации происходит из-за того, что энергосистемы продают электроэнергию потребителям на различных напряжениях от 0,4 до 220 кВ, а другим энергосистемам — на напряжении межсистемных линий 330 кВ и выше и контролируют параметры режима в разных точках сети: как в точках, где трансформируется напряжение, так и в точках, где происходит преобразование электроэнергии в другой вид энергии (обычно при напряжении 0,4—10 кВ). В первом случае параметры режима регламентируются по условиям работы основного оборудования сети, а во втором случае — нормами ГОСТ 13109-67, часто без должного между ними соответствия.

Усилиями многих исследователей [Л. 1 и 2] доказан народнохозяйственный ущерб от реализации некондиционной электроэнергии. Энергосистемы также несут ущерб при передаче и распределении энергии со сниженными показателями качества, который в основном заключается в снижении производительности агрегатов собственного расхода станций и подстанций, в увеличенных потерях энергии и возросшей повреждаемости электротехнического оборудования (двигатели, генераторы, конденсаторы).

Выполненное Уральским отделением (УО) ОРГРЭС обследование сетей ряда энергосистем показало, что во многих случаях электроэнергия продается без контроля ее качества. Выборочные измерения нагрузок в отдельные дни не дают достаточной информации и могут служить лишь для оценки степени загрузки сети. Основными причинами указанного состояния являются:

1. Отсутствие заинтересованности энергосистем в повышении качества энергии. Дело в том, что обосновать экономическую эффективность дополнительных капиталовложений в повышение качества электроэнергии можно лишь при учете эффекта у потребителя. Энергосистемы, работающие в условиях новой системы планирования и экономического

стимулирования, не заинтересованы в таких затратах, так как последние ухудшают экономические показатели энергосистем и, в частности, уменьшают прибыль. Таким образом, даже при доказанном народнохозяйственном эффекте энергосистема не заинтересована в дополнительных капиталовложениях, не приносящих ей экономического эффекта.

2. Незнание потребителями диапазона значений параметров качества электроэнергии, при которых технологический процесс наиболее экономичен. Этим объясняется в основном тот факт, что потребители не контролируют показатели качества электроэнергии до тех пор, пока последние не выходят за технически допустимые пределы, при которых или нарушается технологический процесс, или увеличивается аварийность агрегатов.

В результате наблюдается:

а) недостаточное оснащение распределительных сетей энергосистем средствами регулирования режима, что приводит к тому, что только крупные потребители энергии имеют возможность получить энергию с регулируемыми параметрами в контрольной точке сети;

б) практически полное отсутствие в энергосистемах приборов контроля многих показателей качества электроэнергии; как известно, электропромышленностью выпущены несколько сотен статистических анализаторов качества напряжения и небольшая партия анализаторов несинусоидальности, приборы контроля других показателей качества электроэнергии находятся в стадии разработки;

в) неиспользование взаимных санкций энергосистемы и потребителя при поставках некондиционной электроэнергии.

На основании работ УО ОРГРЭС и анализа данных [Л. 1 и 2] можно следующим образом оценить показатели качества электроэнергии в контрольных точках сети.

1. Отклонения частоты в обследованных энергосистемах (как изолированных от единой энергетической системы, так и работающих параллельно с ней) при достаточном значении резерва мощности и правильном распределении его между станциями и при автоматическом регулировании частоты незначительны (обычно не превосходят 0,1 гц). Учитывая тенденцию к стабилизации частоты при росте мощности объединения и технические возможности измерения частоты (до 0,01 гц), сейчас можно ставить вопрос об уменьшении допустимого диапазона отклонений частоты. Ведение режима с меньшими отклонениями частоты экономически выгодно даже

15. Маркушевич Н. С., Крикет Д. Д. Регистрация несинусоидальности кривой напряжения в электрических сетях. — «Промышленная энергетика», 1973, № 2, с. 117—20.

16. Маркушевич Н. С. Форма кривой напряжения в основных сетях энергосистемы. — «Электрические станции», 1972, № 7, с. 65—67.

17. Маркушевич Н. С. Принципы автоматизированного управления режимом распределительных сетей. — «Экспресс-информация ВИНТИ. Средства управления в энергетике», 1973, № 8, с. 37—39.

при учете эффекта снижения нагрузки при пониженной частоте.

2. Колебания частоты в нормальных режимах не наблюдаются даже в изолированно работающих системах, так как флуктуация нагрузок несоизмеримо мала по сравнению с мощностью систем. Частотные характеристики энергосистем в зоне эксплуатационных колебаний частоты имеют крутизну 10—14 о. е., что также является причиной отсутствия колебаний частоты.

3. Анализ отклонений напряжения в распределительных сетях показал, что общим для большинства трансформаторных подстанций обследованных городских сетей является повышенное напряжение на шинах 0,4 кВ, особенно в часы провалов нагрузки, что говорит об отсутствии или малой глубине встречного регулирования напряжения на шинах 6—10 кВ подстанций, питающих городские сети. Большую часть времени отклонения напряжения находятся в интервале +5—12% (ночью +12%). Отрицательные отклонения встречаются крайне редко. Гистограммы отклонений напряжения имеют математические ожидания отклонений напряжения в пределах (107—110%) $U_{ном}$ с рассеиванием (стандартным отклонением) 1,5—2,5%. В то же время на большинстве трансформаторов ответвления находятся в среднем положении. Обычно в городских сетях переключением ответвлений на ТП можно добиться снижения напряжения на зажимах потребителей до верхней границы по ГОСТ без снижения напряжения в сети 6—10 кВ, что позволяет, кроме улучшения качества электроэнергии у потребителей, уменьшить потери энергии в сетях 6 кВ и выше за счет уменьшения нагрузок согласно их статическим характеристикам. Одновременно уменьшились бы потери энергии в стали распределительных трансформаторов 6—10/0,4 кВ, которые по расчетам, проведенным УО ОРГРЭС, составляют около половины потерь энергии в сетях 6—10 кВ городов.

Характерной особенностью гистограмм отклонений напряжения на шинах 0,4 кВ, питающих сельскохозяйственную нагрузку, является большое рассеивание вокруг среднего значения (3,5% и выше). При фактических диапазонах математического ожидания напряжения на шинах 0,4 кВ от 90 до 110% $U_{ном}$ на одном фидере 6—10 кВ одновременно могут быть ТП с завышенным и заниженным напряжением. Настроить режим такой сети по допустимым пределам отклонений напряжений переключением ответвлений и автоматизацией регулирования напряжения в центре питания невозможно без применения местных средств регулирования напряжения, например, регулируемых конденсаторных батарей.

Исследования УО ОРГРЭС коммунально-бытовых и сельскохозяйственных сетей показали непригодность нормального закона для отклонений напряжения у приемников. Влияние различных факторов (временных, технологических) становится все меньше при движении от ТП к ЦП. Законы распределения отклонений напряжений для ЦП ближе к нормальному: вероятность подчинения нормальному закону достигает 0,8—0,9 (по критерию согласия Колмогорова) и в некоторых случаях подчиняется нормальному закону. Закон распределения откло-

нений напряжения для контрольных точек в сетях 35 кВ и выше можно считать нормальным. Следовательно, для анализа режима сети можно использовать две характеристики закона распределения — математическое ожидание и дисперсию.

Средств ведения режима сети по напряжению (регулируемых батарей статических конденсаторов, вольтодобавочных трансформаторов и т. п.) в энергосистемах явно недостаточно. Кроме того, отсутствуют методики настройки режима сети при совместном применении и многоцелевом использовании различных средств регулирования.

Настройка режима сети по напряжению должна проводиться на основании расчета предельных значений напряжений для плановых нагрузок в узлах основной сети для разных периодов суток. Эти пределы должны обеспечивать возможность регулирования напряжения на шинах ЦП распределительных сетей и, кроме того, обеспечивать минимум потерь электроэнергии в питающих сетях.

4. Касаясь несимметрии напряжений, следует сказать, что в обследованных энергосистемах наблюдается несимметрия напряжений, вызываемая как несимметрией параметров сети (длительный неполнофазный режим ВЛ), так и несимметрией приемников электроэнергии. Поскольку существует тенденция к применению мощных однофазных приемников и трехфазных печей с отдельной регулировкой нагрузки фаз, возможны случаи, когда несимметрия напряжений выйдет за допустимые пределы. Работа электрической сети при ухудшении этого показателя характеризуется возрастающей аварийностью двигателей и генераторов станций, поэтому случаи несимметрии напряжения должны предварительно рассчитываться и тщательно контролироваться.

5. Особого внимания заслуживает вопрос о несиноусоидальности формы кривой напряжения. Как известно, тяговые нагрузки, являющиеся источником высших гармонических, изучались многими исследователями. Но в энергосистемах имеются и другие источники высших гармонических — элементы с нелинейными характеристиками, их количество все увеличивается, что приводит к тому, что несиноусоидальность формы кривой напряжения оказывается выше нормированной. Состав гармонических и их значение во многом зависят от режима работы источников высших гармонических, их мощности и от режима энергосистемы. Высшие гармонические (четные и нечетные) наблюдаются как в питающих, так и в распределительных сетях; форма кривой напряжения существенно изменяется во времени и соответствует изменениям нагрузки. По данным [Л. 2] действующее значение суммы гармонических в сетях одного из промышленных предприятий составляло 8% в дневное время, а в городских сетях — 4% и значительно возросло в периоды снижения активной нагрузки.

Дальнейшее внедрение преобразовательных устройств, увеличение числа трансформаций и использование регулируемых ферромагнитных устройств будут усугублять искажение формы кривой напряжения¹. Поэтому необходимы дальнейшие

¹ Ферромагнитные устройства могут быть выполнены так, что не будут генерировать высших гармоник.

исследования по распределению спектра гармоник каждого источника и характера его изменения, по выявлению влияния режима нелинейных элементов на режим сети и разработке мероприятий, снижающих влияние высших гармоник напряжения и тока на приемники электроэнергии и автоматические устройства.

В связи с тем, что значения показателей качества меняются по случайному закону, целесообразно использовать для контроля режима сети методы статистического контроля [Л. 3]. Техническим вспомогательным средством является контрольная карта, позволяющая наглядно отразить изменчивость параметра во времени. Можно рекомендовать следующие виды контрольных карт: карту средних значений (\bar{x}), карту индивидуальных значений и комбинированные контрольные карты типа (\bar{x}/σ_x). Введение текущего контроля за параметрами режима сети позволяет получить обоснованные данные для расчетных режимов на любых участках графика нагрузки.

Для этих целей подходят приборы, имеющиеся в распоряжении персонала, что особенно важно, так как приборы для статистического анализа еще не получили достаточного распространения в энергосистемах. Полученные статистические данные могут быть использованы в расчетах плановых режимов, оценки состояния сети и целесообразности корректировки режима.



Повышение качества электрической энергии в распределительных сетях

Доктор техн. наук ГУСЕЙНОВ Ф. Г., канд. техн. наук МАМЕДЯРОВ О. С.

Азербайджанский научно-исследовательский институт энергетики им. И. Г. Есьмана

Обеспечение потребителей электрической энергией высокого качества имеет важное народнохозяйственное значение и является одним из основных направлений оптимизации развития и эксплуатации электрических систем.

Настоящая статья посвящается использованию статистических и экономических характеристик комплексных узлов нагрузок для повышения качества напряжения, приложению теории подобия для обобщения опытных экономических характеристик на класс подобных объектов, а также применению метода факторного планирования эксперимента для получения упрощенных уравнений регрессии, на основе которых удобно производить оптимизацию режима и качества напряжения распределительных сетей.

Статические характеристики узлов нагрузок и их применение при оптимизации качества напряжения. Статические характеристики по напряжению являются одними из основных характеристик узлов нагрузок современных электрических систем. Они содержат ценную информацию об узлах нагрузок, необходимую при решении многих режимных задач в области экономичности и надежности работы системы. В частности, статические характеристики необходимы для построения экономической харак-

Выводы. 1. В сетях обследованных энергосистем наблюдаются режимы, при которых показатели качества электроэнергии не соответствуют ГОСТ 13109-67. Большинство показателей качества электроэнергии контролируются эпизодически.

2. В режимах, когда не выдерживаются нормы ГОСТ, нельзя быть уверенным в применимости общепринятых методик (так как последние базируются на расчетах симметричной сети при симметричных нагрузках и синусоидальном напряжении) и в правильности работы режимной автоматики и релейной защиты (так как измерительные органы последней настроены на первую гармонику, часто при однофазном ее измерении).

3. Ожидает своего решения вопрос об использовании многопараметрической информации о режиме сети. Сложность его усугубляется тем, что эта информация разноревненна и взаимозависима, а ее связь с функцией затрат на передачу и распределение электроэнергии нормированной надежности и качества недостаточно исследована.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Регулирование напряжения в электрических сетях. Сб. докладов Всесоюзного совещания по вопросам регулирования напряжения в электрических сетях. М., «Энергия», 1968.
2. Тезисы докладов на III Всесоюзном совещании по качеству электроэнергии. М., 1973.
3. Штурм Р. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества. М., «Мир», 1970.

[5.8.1974]

УДК 621.311:658.562

теристики комплексных потребителей (цех, предприятие и др.) и определения оптимального напряжения на основе функции суммарных приведенных затрат. Указанные характеристики используются для применения теории подобия с целью обобщения полученных результатов о качестве энергии на большой класс объектов. Поэтому разработка более совершенных экспериментальных методов снятия этих характеристик, аппроксимации и экстраполяции их для расширения области их применения в различных классах системных задач имеет большое теоретическое и практическое значение.

Применение методов статической динамики для получения передаточной функции, частотной и статической характеристик по напряжению узла нагрузки на основе пассивного эксперимента. В качестве исходной информации при этом принимаются наблюдаемые в процессе нормальной работы узла нагрузки случайные изменения напряжения и тока на его входных зажимах.

Для выделения и регистрации случайных отклонений (флуктуаций) тока и напряжения в узле нагрузки используется специальный преобразователь, с помощью которого исключается базисная часть кривой напряжения и тока и записывается только

Таблица 1

Состав нагрузки	Количество элементов			Мощность, %		
	I	II	III	I	II	III
Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором по 2,8 кВт, нагрузка—электромагнитный тормоз	1	2	3	34	46	53
Синхронные двигатели СГН-4,5, $n=1560$ об/мин, нагрузка—генератор постоянного тока ПН-85К	1	1	1	42	29	22
Пассивная нагрузка—реостат	1	1	1	24	25	25

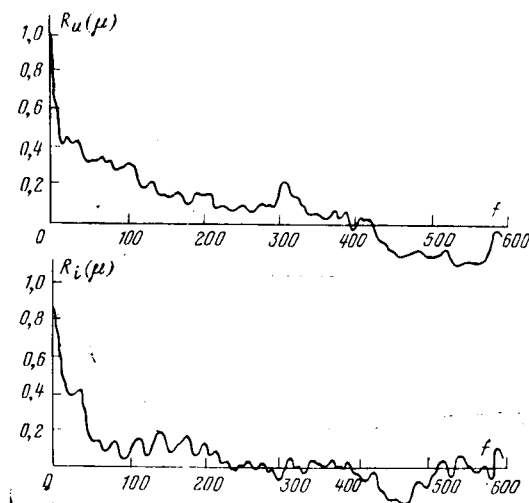


Рис. 1.

случайное изменение этих величин самопишущими приборами. Погрешность измерения составляет не более чем $\pm 5\%$.

Полученные случайные изменения тока и напряжения используются в следующем порядке:

1. Узел нагрузки рассматривается как двухполюсник с входной величиной $I(U)$ и выходной $U(I)$.

2. Анализом случайных функций $U(t)$, $i(t)$ определяются значения f_v , f_n и по ним — шаг дискретности $\Delta=0,3$ сек и период наблюдения $T=5$ —10 мин.

3. Определяется стационарность случайных функций тока и напряжения в интервале наблюдения T .

4. Определяются автокорреляционные и взаимокорреляционные функции входа и выхода: $R_i(\mu)$, $R_u(\mu)$, $R_{i,u}(\mu)$.

5. Определяется передаточная функция узла нагрузки или по уравнению

$$R_{i,u}(\mu) = \int_0^\infty R_y(\mu - \theta) k(t) dt$$

или частотным методом на основе изображений корреляционных функций по Фурье (спектральные плотности мощностей):

$$W(j\omega) = \frac{S_{i,u}(\omega)}{S_i(\omega)}.$$

При этом форма (порядок) передаточной функции нагрузки задается в зависимости от области допустимой вариации частоты.

Для выполнения расчетов по указанному методу разработаны соответствующие программы для ЦВМ «Минск-22».

В качестве примера разработанная методика и программа были использованы для определения передаточной функции и характеристик типовой нагрузки энергосистемы Азэнерго. Эти узлы нагрузки содержали все основные потребители нефтепромысловой нагрузки — компрессорную, нефтеводонасосную и станки-качалки. С помощью преобразователя были получены регистрограммы изменения токов и напряжения в процессе нормальной работы системы.

Из общей часовой записи тока и напряжения были выбраны стационарные участки длиной около

5 мин и определены 1500 числовых значений, квантованные шагом $\Delta=0,3$ сек.

Корреляционные функции U и I приведены на рис. 1, а спектральные плотности — на рис. 2.

Передаточная функция $W_{IU}(p)$ определяется путем аппроксимации амплитудной и фазовой частотных характеристик методом наименьших квадратов.

Снятие и анализ статических характеристик на физической модели узла нагрузки. Эксперименты проводились с целью проверки адекватности математической модели и оригинала;

возможности аналитической экстраполяции опытных статических характеристик на область более низких напряжений (до $U_{кр}$);

точности метода нахождения параметров эквивалентных элементов узла нагрузки.

Статические характеристики были сняты для трех вариантов состава смешанной нагрузки (см. табл. 1), которые с целью сравнения строились в относительных единицах.

При опытах напряжение регулировалось в пределах $1,1 U_n$ до $U_{кр}$.

Аппроксимацией опытной статической характеристики в области $(0,85 \div 1,1) U_n$ получено аналитическое выражение:

$$Q = 0,621 k_u^4 + 0,023 \frac{1}{k_u^2 - 0,64} - 0,312 \left(\frac{k_u^4 - 0,49}{1 - 0,49} \right)^{0,5} + 0,569 k_u^3. \quad (1)$$

Методика аппроксимации с использованием ЦВМ приведена в [Л. 1].

На основе полученных аналитических выражений установлена возможность аналитической экстраполяции статической характеристики, снятой в области $(0,85 \div 1,1) U_n$, на более широкую область изменения напряжения.

Определялись эквивалентные параметры модельной нагрузки на ЦВМ по алгоритму и программе [Л. 2]. Сравнение их с фактическими значениями этих параметров показывает хорошую сходимость. Показано также, что расчет-

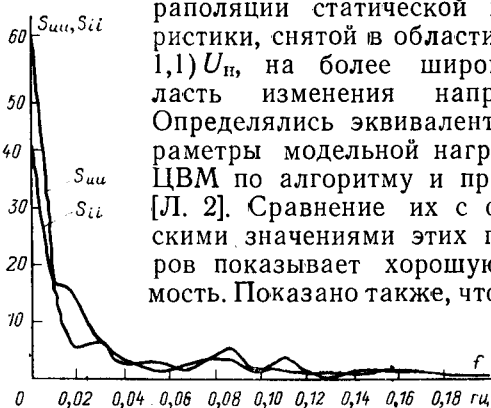


Рис. 2.

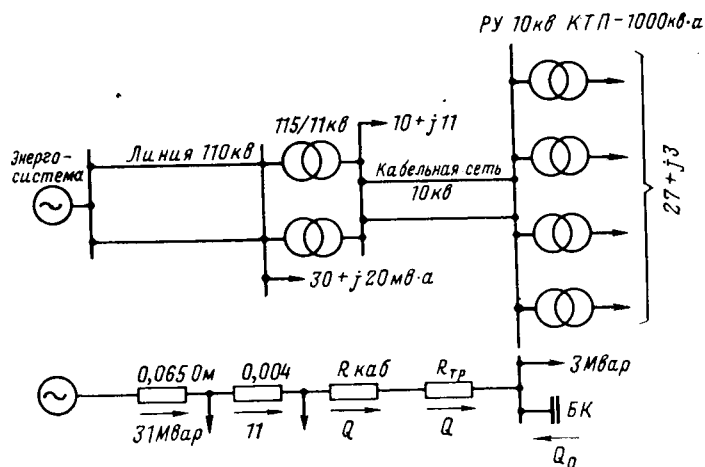


Рис. 3.

ные значения критического напряжения практически совпадают с его значением, установленным из эксперимента.

Обобщение экономической характеристики по напряжению конкретного промышленного предприятия методами теории подобия. Экономические характеристики группы потребителей, цехов и всего предприятия в целом определяются экспериментальными или аналитическими методами. Полученные при этом характеристики относятся только к данному объекту. Обобщение полученных результатов на подобный класс объектов методами теории подобия расширяет значение единичных экспериментов.

Математическая модель суммарных затрат объекта

$$Z(U_1, a_1, a_2, \dots, a_n, b_1, b_2, \dots, b_m). \quad (2)$$

В выражение (2) входят независимая переменная (U_1) и многочисленные варьируемые параметры технического (a_i) и экономического (b_j) порядка ($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$).

Взамен параметров a_i, b_j можно ввести обобщенные параметры (критерии подобия), количество которых будет значительно меньше, чем $(n+m)$. По экономической характеристике для одного из цехов завода нефтяного машиностроения были определены оптимальное значение напряжения ($1,05 \div 1,07$) и годовой экономический эффект [Л. 3 и 4].

Математическая модель комплексного узла нагрузки составлена в виде зависимостей активной и реактивной мощностей от напряжения $P(U), Q(U)$, используя которые определена функция суммарных затрат:

$$Z = k_1 P_{2H} \left(1 - \frac{1}{x^2}\right)^2 + \beta \left(P_{0H} x + \Delta P_{1H} \frac{1}{x} + \Delta P_{0H} x\right) + k_1 P_{cH} x + \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{T} k_2 \left(Q_{0H} x + \Delta Q_{1H} \frac{1}{x} + \Delta Q_{0H} x\right), \quad (3)$$

где $P_{2H}, P_{0H}, \Delta P_{1H}, \Delta P_{0H}, \Delta Q_{1H}, \Delta Q_{0H}$ — мощности при номинальном напряжении; T — число часов в году; $k_1, k_2, \beta, \epsilon_1, \epsilon_2, P_c$ — постоянные коэффициенты технического и экономического порядка, которые являются заданными для исследуемого объекта; $x = k^2 u, k_u = U/U_H$.

Методом базовой точки выведены критерии подобия для функции суммарных затрат по напряже-

нию, использование которых позволяет распространить полученную экономическую характеристику на большой класс подобных объектов:

$$\pi_2 = \frac{A_2 \bar{Z}_{26}}{A_1 \bar{Z}_{16}}; \pi_3 = \frac{A_3 \bar{Z}_{35}}{A_1 \bar{Z}_{16}}; \pi_4 = \frac{A_4 \bar{Z}_{45}}{A_1 \bar{Z}_{16}}, \quad (4)$$

π_2, π_3, π_4 — обобщенные комплексные параметры или критерии подобия, зависящие от исходных многочисленных параметров и базисного значения напряжения U_6 .

Анализом функции суммарных затрат определено количественное значение критерия подобия для исследуемого объекта.

Выбор и размещение компенсирующих устройств в распределительных сетях с использованием метода планирования эксперимента. Критерием экономичности использования компенсирующих устройств (КУ) при проектировании и реконструкции сети является минимум расчетных затрат. При проектировании мощность КУ и место ее размещения определяются одновременно с выбором других ее элементов и устройств для регулирования напряжения. При реконструкции учитывается имеющееся в наличии оборудование. Решение находится путем исследования различных вариантов. При этом в каждом варианте параметры элементов сети (сечение проводов F_e и число линий, мощность трансформаторов S_T и их число и т. п.) должны быть согласованы с предполагаемыми параметрами КУ.

Задача выбора экономичных источников реактивной мощности и оптимальной степени использования каждого из них сводится к минимизации функции суммарных расчетных затрат, обусловленных генерацией и передачей реактивной мощности от всех источников, в рассматриваемый пункт сети с учетом ограничений, накладываемых на величины генерируемой мощности, напряжений U_i во всех узлах и токов I_e в ветвях.

Задача сводится к квадратичному программированию и решается методом неопределенных множителей Лагранжа. Однако такой метод решения весьма трудоемок, и не всегда среди рассмотренных вариантов находится действительно наивыгоднейший.

Предлагается решать поставленную задачу аналитически, без рассмотрения вариантов, с использованием математической теории планирования эксперимента (МПЭ) в сочетании с методами линейного программирования. Для этой цели составляется аналитическое выражение суммарных расчетных затрат в зависимости от передаваемой по сети реактивной мощности в предположении линейной зависимости капиталовложений от сечения линий, линейной зависимости капиталовложений и потерь активной мощности от мощности трансформаторов и непрерывности шкалы мощностей трансформаторов и сечений проводов в следующем виде:

$$Z = \sum_{k=0, l=1, c=1}^{n, L, c} \{ Z_{0k}(F_e, S_{T,c}) + Z_{1k}(F_e, S_{T,c}) Q_k + Z_{2k}(F_e, S_{T,c}) Q_k^2 \}. \quad (5)$$

Выражение (5) упростится, если F_e и $S_{T,c}$ выразить через реактивную мощность Q_e и $Q_{T,c}$, которые

зависят от передаваемой из системы мощности Q_c .
Здесь сечение проводов

$$F_e = \frac{\sqrt{P_e^2 + Q_e^2}}{j_{3\pi} U_e^2},$$

а мощность трансформаторов

$$S_{т.с} = \sqrt{P_c^2 + Q_c^2},$$

тогда функция суммарных расчетных затрат

$$Z = \sum_{k=0}^n [Z_{0k}(Q_k) + Z_{1k}(Q_k) + Z_{2k}(Q_k) Q_k^2]. \quad (6)$$

Содержание коэффициентов Z_{0k} , Z_{1k} и Z_{2k} , их определение и решение уравнения (6) изложено в [Л. 5].

На выражение (6) накладываются следующие ограничения:

$$\left. \begin{aligned} \Sigma Q_k &= Q_A; \\ Q_{kmin} &\leq Q_k \leq Q_{kmax}; \\ U_{min} &\leq U_m \leq U_{max}; \\ I_e &\leq I_{emax}; \\ Q_{emin} &\leq Q_e \leq Q_{emax}; \\ Q_{cmin} &\leq Q_c \leq Q_{cmax}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

На основе МПЭ функцию (6) и ограничения (7) можно представить в виде

$$Z = Z_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i, \quad (8)$$

где Z_0 — среднее значение функции суммарных затрат; x_i — фактор, однозначно связанный с параметрами $x_i(F_e, S_{т.с}, Q_k)$, a_i — вклад фактора x_i , получаемый в результате проведения серии расчетов по строго определенному плану [Л. 6].

Применение МПЭ к исследованию распределительных сетей по реактивной мощности показывает, что в большинстве случаев линейная аппроксимация (8) адекватна истинным соотношениям [Л. 7], что дает возможность найти искомые оптимальные параметры F_e , $S_{т.с}$, Q_k методами линейного программирования. Таким образом, с помощью МПЭ определяется линейная математическая модель системы, а определение оптимальных параметров выполняется методами линейного программирования (симплекс-методом). При многофакторной задаче с большим числом ограничений метод имеет значительные преимущества перед методом Лагранжа.

Исследования показывают, что неточность задания исходных данных оказывает существенное влияние на показатели качества электрической энергии, на выбор элементов сети, регулирующих и компенсирующих устройств. Неточность задания является следствием погрешности экспериментального или расчетного определения параметров системы, разброса параметров элементов системы электроснабжения из-за метеорологических и других внешних воздействий и т. п. Неучет стохастического характера исходных данных, наряду с искажением технических показателей режима, оказывает также существенное влияние на экономичность,

При выборе КУ необходимо установить факторы, существенно влияющие на их мощности. Для этой цели целесообразным оказывается использование МПЭ. В [Л. 8] показаны методика определения существенных параметров с использованием МПЭ и числовые характеристики законов распределения активного сопротивления ЛЭП различного назначения и напряжения.

Зная законы распределения существенных факторов или их доверительные интервалы, с использованием МПЭ определяются уравнения регрессии зависимости мощности КУ Q_k и суммарных расчетных затрат от существенных факторов — уравнение типа (8). Придавая в уравнениях регрессии предельные значения существенным факторам, можно определить и предельные значения искомых величин. Свободный член в этих уравнениях соответствует математическим ожиданиям. По минимуму математического ожидания затрат определяются оптимальные значения выбираемых мощностей КУ, причем минимум математического ожидания не всегда соответствует минимуму функции при детерминированной постановке.

Приведенные положения иллюстрируются на примере. Для схемы электроснабжения (рис. 3) требуется определить оптимальные параметры F_e , $S_{т.с}$, Q_k , а также проверить мощность КУ Q_k при вероятностном характере изменения исходных данных.

Принимаются следующие пределы изменения варьируемых факторов и ограничения: $F_e = 100 \div 190 \text{ мм}^2$; $S_{т.с} = 4 \div 6 \text{ Мва}$; $Q = 0 \div [0,75 + 1,25 (S_{т.с} - 4)]$; $U = 9,5 \div 10,5 \text{ кв}$.

Неточность задания исходных данных принималась: $Q_n = \pm 10\%$, $r_{л} = \pm 10\%$ (I вариант) и $r_{л} = 0 \div +20\%$ (II вариант).

Для рассмотренной схемы МПЭ получены следующие линейные уравнения: $Z = 10158 + 8,9F_e + 2837S_{т.с} + 422Q_k$; $U = 10,27 + 5,34 \cdot 10^{-4}F_e + 2,2 \times 10^{-3}S_{т.с} - 0,134Q_k$.

Решением данной системы уравнений с условиями ограничения симплекс-методом получены следующие значения оптимальных параметров: $F_e = 2(3 \times 50) \text{ мм}^2$; $S_{т.с} = 4 \times 1000 \text{ ква}$; $Q_k = 3 \text{ Мва}$.

С учетом неточности задания исходных данных получены следующие уравнения оптимальной величины реактивной мощности, поступающей из системы $Q_c = Q_n - Q_k = f(Q_1, Q_2, r_1, r_2)$ и суммарных расчетных затрат $Z = f(Q_1, Q_2, r_1, r_2)$ в виде:

$$Q_c = -0,35 - 0,46Q_1'' - 0,59r_1'' - 0,16Q_2'' - 0,009r_2'';$$

$$Z = 23376 - 68,6Q_1'' - 85r_1'' - 21,8Q_2'' - 2,06r_2''$$

для I варианта, когда $r_{л}$ изменяется в пределах $\pm 10\%$ и

$$Q_c = -1,33 - 0,675Q_1'' - 0,834r_1'' - 0,238Q_2'' - 0,011r_2'';$$

$$Z = 23056 - 252Q_1'' - 388r_1'' - 89Q_2'' - 4,3r_2''$$

для II варианта, когда $r_{л}$ изменяется в пределах $0 \div +20\%$.

Результаты расчетов при учете неточности задания исходных данных и при детерминированных исходных данных приведены в табл. 2.

Таблица 2

Детерминированная форма задания исходных данных		Вероятностное задание исходных данных			
		I вариант		II вариант	
Q_k , Мвар	З, руб.	Q_k	З	Q_k	З
3,0	23 412	3,35	23 376	4,33	23 056

Из сопоставления данных табл. 2 следует, что при учете неточности задания исходных данных величина мощности КУ, а также суммарные расчетные затраты изменяются и, как правило, отличаются от результатов детерминированных исходных данных. В рассмотренных случаях при изменении активного сопротивления линий в пределах от 0 до +20% необходимая мощность компенсирующих устройств увеличивается по сравнению с детерминированной постановкой задачи на 44%, а суммарные затраты при этом уменьшаются на 2%, т. е. за счет учета неточности задания исходных данных достигается экономия народнохозяйственных затрат. Расчеты выполнялись на ЦВМ «Наири-2».



Высшие гармоники в электрических сетях

Канд. техн. наук ЖЕЖЕЛЕНКО И. В.

Ждановский металлургический институт,

канд. техн. наук СОРОКИН В. М.

Энергетический институт им. Г. М. Кржижановского

Проблема высших гармоник возникла в связи с интенсивным ростом мощностей вентильных преобразователей, электродуговых печей, сварочных установок и других устройств, вольт-амперные характеристики которых существенно нелинейны. Искажение кривых токов и напряжений в электрических сетях, обусловленное этими нагрузками, характеризуется, как правило, дискретным спектром амплитуд и начальных фаз гармоник.

Появление высших гармоник приводит к ухудшению качества электроэнергии в сетях энергосистем и промышленных предприятий; неблагоприятное влияние гармоник на электрооборудование, некоторые виды релейных защит и измерительных приборов, системы автоматики, телемеханики и связи обуславливает снижение экономических показателей и надежности работы электросетей.

В табл. 1 представлены результаты массовых измерений гармоник, проведенных в 1969—1973 гг. Коэффициент несинусоидальности определялся по выражению:

$$k_{nc} = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{50} U_v^2}}{U_1} \quad (1)$$

Согласно ГОСТ 13109-67, а также нормам, принятым в странах СЭВ и ряде стран Западной Европы, допустимое значение коэффициента несинусоидальности ограничивается 5%. Из табл. 1 следует, что в настоящее время значения показателей несинусоидальности в ряде случаев значительно превосходят нормированные значения; при этом в большей или меньшей мере проявляется влияние гармоник на электроустановки. Ниже рассматриваются основные вопросы, определяющие содержание этой проблемы: оценка влияния гармоник на электроустановки; количественная оценка уровней гармоник, генерируемых нелинейными нагрузками, и прогнозирование величин гармоник тока и напряжения в различных режимах работы электросетей; снижение уровней гармоник.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусейнов Ф. Г., Рахманов Н. Р. О статистических характеристиках комплексной нагрузки электрической системы. — «Труды АЗНИИЭнергетики», 1967, т. XVII.
2. Рахманов Н. Р. Некоторые вопросы эквивалентирования нагрузок электрических систем. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Баку, 1968 (Азинефтехим).
3. Мамедяров О. С., Исмаилова Т. А. О построении экономической характеристики и определении ущерба у потребителей промпредприятий. — В сб.: Регулирование напряжения в электрических сетях. М., «Энергия», 1968.
4. Мамедяров О. С., Исмаилова Т. А. Статистическое определение экономической характеристики потребителей промпредприятий. — «За технический прогресс», 1968, № 12.
5. Карпов Ф. Ф., Солдаткина Л. А. Регулирование напряжения в электрических сетях промышленных предприятий. М., «Энергия», 1970.
6. Налимов В. В., Чернова Н. А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М., «Наука», 1965.
7. Влияние оптимальных параметров электрических систем при многофункциональном поиске. Доклад на Всесоюзной объединенной межвузовской конференции по физическому моделированию и кибернетике энергетических систем. Баку, Изд. Азинефтехим, 1972. Авт.: Анисимова Н. Д., Веников В. А., Круг Н. К., Корнеева А. Д.
8. Абдулов Д. А., Жабинский Ю. В., Мамедяров О. С. Исследование факторов, существенно влияющих на режим электрической сети при вероятностном характере исходной информации. — «Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт», 1973, № 4.

[5.8.1974]

УДК 621.316.1.018.3

Влияние высших гармоник на электроустановки. Высшие гармоники напряжения и тока неблагоприятно влияют на электрооборудование, системы автоматики, релейной защиты, телемеханики и связи: появляются дополнительные потери в электрических машинах, трансформаторах и сетях; затрудняется компенсация реактивной мощности с помощью батарей конденсаторов; сокращается срок службы изоляции электрических машин и аппаратов; возрастает аварийность в кабельных сетях; ухудшается качество работы, а иногда появляются сбои в работе систем релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи. Искажение формы кривых напряжений сказывается также на значениях коэффициента мощности и вращающего момента электродвигателей (однако снижение этих величин, даже при коэффициенте несинусоидальности около 10—15%, весьма небольшое).

Уровень дополнительных активных потерь от высших гармоник в основных сетях электрических систем составляет 2—4% потерь при синусоидальном напряжении. В сетях предприятий, крупных промышленных центров, а также сетях электрифицированного железнодорожного транспорта эти потери могут достигать 10—15%. Во многих электрических сетях различных напряжений с источниками гармоник батареи конденсаторов по существу не работают: они либо отключаются вследствие перегрузки по току (и мощности), либо за короткий срок выходят из строя в результате вспучиваний, а иногда и взрывов. В тяговых и промышленных электросетях с вентильными преобразователями перегрузки конденсаторов зафиксированы при резонансе на частотах гармоник даже весьма высоких порядков (40—50-х), в сетях с электродуговыми печами и сварочными установками — на частотах 3—7-й гармоники.

При несинусоидальном напряжении наблюдается ускоренное старение изоляции электрических машин, трансформаторов, конденсаторов и кабелей в результате необратимых физико-химических процессов, протекающих под воздействием полей высших гармоник, а также повышенного нагрева токоведущих частей. «Время жизни» изоляции классов А и В,

Таблица 1

Предприятие, сеть	Источники гармоник	Коэффициент несинусоидальности k_{nc} , %	Относительные величины гармоники напряжения, %	Изменения начальных фаз гармоники
Металлургические и алюминиевые заводы, горнообогатительные комбинаты	Вентильные преобразователи	10—15	3—4 (5—13-я гармоники)	Стабильны или 0—2π
Машиностроительные и химические заводы, целлюлозно-бумажные комбинаты	Вентильные преобразователи, сварка, дуговые лампы	5—7	2—3 (3 и 5-я гармоники)	Стабильны или 0—2π
Электросталеплавильное производство	Электродуговые печи	5—6	2—3 (2 и 3-я гармоники) 1—2 (5 и 7-я гармоники)	Данных нет
Подстанции крупных промышленных центров с развитым электрифицированным транспортом	Вентильные преобразователи, сварка, дуговые лампы	18—20	5—7 (3 и 5-я гармоники)	0—2π
Сети 110—220—330 кВ районных энергосистем	Вентильные преобразователи, силовые трансформаторы	5—15	1,5—2 (для гармоник до 25-го порядка включительно)	Стабильны либо изменяются в пределах 20—30°

имеющей наибольшее распространение в электроэнергетике, при синусоидальном и несинусоидальном напряжении (соответственно t_c и t_{nc}) определяется выражениями:

$$t_c = t_0 2^{\frac{\tau_m - \tau_c}{\theta}}; \quad (2)$$

$$t_{nc} = t_0 2^{\frac{\tau_m - \tau_{nc}}{\theta}}, \quad (3)$$

где t_0 — срок службы изоляции при максимальной нормированной температуре τ_m ; τ_c и τ_{nc} — температура изоляции в длительном режиме работы оборудования при синусоидальном и несинусоидальном напряжении; θ — температурная постоянная, равная приращению температуры, при которой срок службы изоляции сокращается вдвое. Относительное сокращение срока службы изоляции при несинусоидальном напряжении $\Delta t/t_c$ получим, разделив (3) на (2):

$$\frac{\Delta t}{t_c} = 1 - 2^{\frac{\tau_c - \tau_{nc}}{\theta}}. \quad (4)$$

На основании (4) можно заключить, что, например для изоляции класса В, применяемой в турбогенераторах [Л. 10], дополнительный нагрев на 2°C приводит к сокращению срока службы изоляции на 16%, если турбогенератор работает в базовом режиме при неизменной нагрузке. Для турбогенератора типа ТВС-30 такой нагрев будет иметь место при номинальной нагрузке и относительных величинах гармоник напряжения на шинах $U_{5*}=0,04$; $U_{7*}=0,03$; $U_{11*}=U_{13*}=0,02$. Дополнительный нагрев изоляции обмотки силовых трансформаторов [Л. 1]

$$\tau_c - \tau_{nc} \approx 0,6 \sum_{v=2}^n k_{1v}^2 k_{rv}, \quad (5)$$

где k_{1v} — относительная величина тока v -й гармоники тока протекающего через трансформатор, в долях от тока 1-й гармоники; k_{rv} — коэффициент, учитывающий возрастание сопротивления обмотки вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости.

Расчеты показывают, что срок службы изоляции трансформаторов мощностью 40,5 Мва, питающих непрерывный стан горячей прокатки «1700», оборудованный вентильными преобразователями, вследствие дополнительного нагрева токами гармоник сокращается на 6,5%.

Температура перегрева изоляции бумажно-масляных конденсаторов в наиболее горячей точке в зависимости от мощности потерь при синусоидальном напряжении P_c , выражается зависимостью [Л. 8]:

$$\tau_{пер} = A_r P_c, \quad (6a)$$

где A_r — постоянный коэффициент, зависящий от габарита конденсатора.

При несинусоидальном напряжении согласно (4)

$$\frac{\Delta t}{t_c} = 1 - 2^{\frac{A_r P_c (1-\eta)}{\theta}}, \quad (6b)$$

$$\eta = \frac{\sum_{v=1}^n v U_v^2}{\sum_{v=1}^n U_v^2}.$$

Формула (6b) получена в предположении, что коэффициент диэлектрических потерь одинаков для всех частот.

Для конденсаторов 2-го габарита ($A_r=0,25$) в случае $U_{5*}=0,04$; $U_{7*}=0,03$; $U_{11*}=U_{13*}=0,02$ оказывается $\Delta t/t_c=0,47$, т. е. срок службы изоляции при стабильном режиме работы конденсаторов сокращается на 53%.

При возрастании амплитуды напряжения (и напряженности поля E_m) за счет гармоник сокращается срок службы изоляции конденсаторов [Л. 8]:

$$\Delta t = \frac{T_0}{\frac{1}{\alpha^2 (\alpha^4 - 1) \arccos \alpha} - \frac{1}{\beta^2 (\beta^4 - 1) \arccos \beta}}, \quad (7)$$

где $\alpha = E_{m,c}/E_{n,n}$; $\beta = E_{m,nc}/E_{n,n}$; $T_0 = 150 \div 200$ °C; $E_{n,n}$ — напряженность поля, соответствующая напряжению начальной ионизации.

Очевидно, что старение изоляции вследствие дополнительного нагрева и влияния полей высших гармоник происходит более интенсивно, чем при воздействии одного из этих факторов. Однако совместный учет их в настоящее время не представляется возможным.

При несинусоидальном напряжении наблюдается повышенная аварийность в кабельных сетях. Однофазные замыкания возникают значительно чаще, чем при синусоидальном напряжении; значения гармоник тока в контуре нулевой последовательности в ряде случаев составляют 30—40 а, что обуславливает переход однофазных замыканий в междуфазные вследствие прожигания кабелей.

Резонансные повышения напряжения на частотах гармоник в энергосистемах иногда сопровождаются появлением разрядов вдоль гирлянд изоляторов воздушных линий и изоляторов закрытых распределительных устройств. Проникновение гармоник в цепи автоматических систем регулирования может привести не только к ухудшению качества работы, но и к полному расстройству технологического процесса, если не предусмотрены специальные защитные мероприятия.

Во всех рассмотренных случаях отрицательное влияние гармоник на электроустановки в наибольшей мере проявляется при частотах 100—650 гц.

Принятый в настоящее время метод оценки искажения кривых напряжения в электросетях по величине коэффициента

несинусоидальности не позволяет сделать заключение о степени влияния гармоник на электроустановки и величине ущерба, определяемого гармониками. В связи с этим не представляется возможным установить экономически обоснованные нормы на допустимые значения коэффициента несинусоидальности. Недостатки интегральных показателей несинусоидальности делают актуальной задачу установления новых показателей, с помощью которых можно было бы оценить вероятный ущерб от действия гармоник и определить для конкретных электросетей экономически допустимый уровень гармоник.

В ряде случаев наряду с нормированием уровня гармоник напряжения необходимо также указывать допустимые уровни гармоник тока (ток гармоник, проникающих в сети энергосистем; ток гармоник в контуре нулевой последовательности при однофазном замыкании на землю и др.).

Генерирование гармоник нелинейными нагрузками. Применяемые в электроэнергетике многофазные вентиляльные преобразователи рассматриваются как источники гармоник тока. Относительные (в долях от тока 1-й гармоники) комплексные амплитуды высших гармоник сетевого тока I_{ν} при неодинаковых углах управления по различным каналам системы сетевого управления ($\alpha_1 \neq \alpha_2 \neq \dots \neq \alpha_p$) и наличии ошибок углов управления $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_p$ в случае горения вентилей группами по 2 и 3 представляются в виде:

$$I_{\nu} = \frac{\sum_{p=1}^4 \left\{ \pm \frac{1}{\nu} \left[j e^{j\theta_{pk(n)}} + \frac{2}{\nu} \sin \frac{\gamma_p}{2} e^{j\left(\frac{\gamma_p}{2} + \epsilon_p\right)} \right] + \sum_{p=1}^4 \left\{ \pm \left[j e^{j\theta_{pk(n)}} + 2 \sin \frac{\gamma_p}{2} e^{j\left(\frac{\gamma_p}{2} + \epsilon_p\right)} \right] \mp \frac{j \nu}{\nu^2 - 1} \frac{e^{\pm j(\alpha_p - \nu \epsilon_p)} [\pm e^{\mp j(\nu-1) \frac{\gamma_p}{2}} \mp 1]}{\sin\left(\alpha_p + \frac{\gamma_p}{2}\right) \sin \frac{\gamma_p}{2}} \right\} \right\}}{\gamma_p e^{-j(\alpha_p - \epsilon_p)} + \frac{1}{2} \sin \gamma_p e^{j(\alpha_p + \gamma_p + \epsilon_p)}} \mp \frac{1}{\sin\left(\alpha_p + \frac{\gamma_p}{2}\right) \sin \frac{\gamma_p}{2}} \quad (8)$$

где γ_p — угол коммутации для p -го интервала; $\theta_{pk(n)}$ — угол, соответствующий концу (началу) p -го интервала; углы $\theta_{pk(n)}$ принимаются при $p=1; 2 (3; 4)$; верхний знак (плюс или минус) берется для $p=1; 4$, нижний — для $p=2; 3$.

Порядок гармоник канонических порядков ($\epsilon_p=0$) определяется выражением

$$\nu = km \pm 1, \quad (9)$$

где m — число фаз преобразователя; $k=1, 2, 3, \dots$

Начальные фазы гармоник тока φ_{ν} при симметрии сети и системы сетевого (импульсно-фазового) управления находятся по выражению

$$\varphi_{\nu} \approx \left(\alpha + \frac{\gamma}{2} \right) \nu. \quad (10)$$

В первом приближении при малых углах коммутации можно принимать

$$I_{\nu} \approx \frac{I_1}{\nu}. \quad (11)$$

Значения гармоник неканонических порядков $I_{\nu m}^{(n)}$, для которых $\nu \neq km \pm 1$, в общем случае [Л. 3]

$$I_{\nu m}^{(n)} \leq |0,01 \epsilon_{\max}|. \quad (12)$$

Симметрирование импульсов по всем каналам систем сетевого управления и питание их от источника синусоидального напряжения (или установка соответствующих фильтров на входе этих устройств) являются действенными мерами, направленными на минимизацию уровней гармоник неканонических порядков.

Сварочные выпрямители, работающие в нормальных эксплуатационных режимах, генерируют относительно небольшие гармоники тока, определяемые соотношением [Л. 4]

$$I_{\nu} = I_1 / \nu^2. \quad (13)$$

Аналогичная зависимость характеризует уровень гармоник тока, генерируемых электродуговыми сталеплавильными печами:

$$I_{\nu} = \frac{1 \div 1,25}{\nu^2}, \quad \nu = 6k \pm 1; \quad k=1, 2, 3, \dots \quad (14)$$

В токах электродуговых печей значителен уровень аномальных гармоник (в первую очередь 2 и 3-й), достигающих 4—5% тока 1-й гармоники. Сказанное относится также к дугowym и люминесцентным лампам. Значения гармоник тока электродуговых печей и сварочных выпрямителей в 3—4 раза меньше соответствующих гармоник шестифазных вентиляльных преобразователей той же мощности.

Ферросплавные печи, печи электрошлакового переплава и другие, работающие при шунтированной электрической дуге, генерируют значительно меньшие гармоники тока (до 1—2% при $\nu \leq 7$), чем электродуговые печи.

Силовые трансформаторы являются генераторами гармоник тока (э. д. с.), обусловленных нелинейностью ветви намагничивания [Л. 6]; уровень 5-й гармоники достигает 20—30%, 7-й — до 10% номинальной величины намагничивающего тока.

При расчетах отдельных гармоник напряжения необходимо определять сопротивления элементов сетей с учетом их частотных характеристик. Сопротивления трансформаторов, электрических машин, батарей конденсаторов и кабелей на частотах до 5 кГц находятся без учета распределенных параметров и представляются сосредоточенными индуктивностями и емкостями. Для сетей 6—10—35 кВ соотношение активного и реактивного сопротивлений при промышленной частоте [Л. 7]

$$r/x = 0,1 \div 0,3;$$

на частоте ν -й гармоники в предположении, что имеет место резкое проявление поверхностного эффекта, влияние активного сопротивления будет пренебрежимо малым, так как

$$\frac{r_{\nu}}{x_{\nu}} = \frac{0,1 \div 0,3}{\nu}.$$

Для основных сетей энергосистем отношение r_{ν}/x_{ν} оказывается еще меньше. Емкостное сопротивление прямой последовательности сетей x_{c1} для 1-й гармоники примерно в 2 раза отличается от соответствующего сопротивления нулевой последовательности:

$$x_{c1} = \frac{2U}{\sqrt{3} I_c}, \quad (15)$$

где U — линейное напряжение сети; I_c — емкостный ток однофазного замыкания на землю.

Величина x_{c1} оказывает существенное влияние на частотную характеристику эквивалентного сопротивления сети. Так, при емкостных токах однофазного замыкания на землю в сети 6 кВ около 100 а резонансные максимумы характеристики в неактивированных сетях возможны на частотах 17—25-й гармоник.

Входное сопротивление питающей энергосистемы с учетом распределенности параметров воздушных линий определяется выражением

$$x_{\text{вх}\nu} = Z_c \operatorname{tg} \left(\alpha l + \operatorname{arctg} k_{1(2)} \frac{x_{\text{н}\nu}}{Z_c} \right), \quad (16)$$

где Z_c — волновое сопротивление линии; $x_{\text{н}\nu}$ — сопротивление нагрузки линии токам гармоник; α — коэффициент фазы.

Коэффициент $k_{1(2)}$ для сетей некоторых конфигураций определяется согласно табл. 2. Соответствующие формулы получены на основании решения системы канонических уравнений четырехполюсника для каждой из линий.

В случае одиночного или группы согласованно работающих вентиляльных преобразователей ряд гармоник напряжения может быть получен из разложения кривых коммутационных искажений напряжения сети в точке подключения преобразователей. Полученные таким образом расчетные формулы приведены в табл. 3.

В заключение отметим, что расчет гармоник тока и напряжения сопряжен с определенными погрешностями, обусловленными в первую очередь неточностью определения параметров сетей на частотах гармоник и параметров, характеризующих режимы работы нелинейных нагрузок. Погрешность

расчета возрастает с увеличением частоты. Практика расчетов и измерений гармоник свидетельствует о том, что достаточно корректные результаты могут быть получены для частот не более 2500 гц.

Экономическая эффективность снижения уровней гармоник. Оценка экономической эффективности снижения уровней гармоник основывается на формуле приведенных затрат:

$$Z = pK_{\text{осн}} + I_{\text{н}} + Y, \quad (17)$$

где $K_{\text{осн}}$ — единовременные капитальные вложения; $I_{\text{н}}$ и Y — ежегодные издержки производства и народнохозяйственный ущерб, обусловленный воздействием гармоник напряжения и тока на электроустановки; p — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений.

Для сравниваемых вариантов в выражение (17) входят лишь составляющие, обусловленные наличием гармоник, или средств, предназначенных для уменьшения уровня их в электрической сети или отдельных установках. Сравнению подлежат затраты Z_1 в случае, когда снижение уровней гармоник в сети не предусматривается, и затраты $Z_2, \dots, Z_n, \dots, Z_s$ при различных вариантах снижения уровней гармоник с помощью специальных средств. Критерием эффективности этих мероприятий является условие

$$\Delta Z_n = Z_1 - Z_n = \max. \quad (18)$$

На основе приведенной ранее характеристики составляющих ущерба, обусловленного влиянием гармоник на электроустановки, можем записать:

$$\begin{aligned} \Delta Z_n = & p(\Delta K_{\text{к1}} + \Delta K_{\text{тм1}} + \Delta K_{\text{с,с1}} - \Delta K_{\text{оснп}}) + \\ & + u_{\text{к}} \Delta K_{\text{к1}} + u_{\text{р}} \Sigma K_{\text{р1}} + (\Delta u_{\text{а1}} + \Delta u_{\text{т,р1}}) K_{\text{осн1}} + u_{\text{тм}} \Delta K_{\text{тм1}} + \\ & + u_{\text{с,с}} \Delta K_{\text{с,с1}} - (u_{\text{ап}} + u_{\text{т,рп}}) \Delta K_{\text{оснп}} + I_{\text{н1}} - I_{\text{пн}} + M(Y_{\Sigma}), \end{aligned} \quad (19)$$

где $\Delta K_{\text{осн}}$ — единовременные капитальные вложения; $\Delta K_{\text{с,с1}}$ — дополнительные затраты на обеспечение качественной работы устройств автоматики и связи (фильтры, автономные источни-

Схема сети	Выражения для k_1, k_2	Вспомогательные выражения
Радиальная линия	$k = 1$	—
Две параллельные линии l_1, l_2	$k_1 = \frac{(\cos \alpha_v l_2 - \cos \alpha_v l_1) \frac{x_{1v}}{Z_c} + \sin \alpha_v l_2}{\sin \alpha_v l_1 + \sin \alpha_v l_2}$ $k_2 = 1 - k_1$	$\alpha_v = \nu \alpha$
Схема треугольника	$k_1 = 1 + \frac{\frac{x_{1v}}{Z_c} \lg \alpha_v l_3 + \frac{x_{1v}}{x_{2v}} (1 - k_2)}{1 + \frac{Z_c}{x_{2v}} (1 - k_2) \lg \alpha_v l_3}$ $k_2 = \frac{\alpha_v \cos \alpha_v l_3 + b_v + \sin \alpha_v l_1 \sin \alpha_v l_3 - \cos \alpha_v l_3}{b_v + \frac{Z_c}{x_{2v}} \sin \alpha_v l_3}$	$\alpha_v = \cos \alpha_v l_1 + \frac{Z_c}{x_{1v}} \sin \alpha_v l_1$ $b_v = \frac{Z_c}{x_{2v}} (\alpha_v \sin \alpha_v l_3 + \sin \alpha_v l_1 \cos \alpha_v l_3)$

ки питания); $\Delta K_{\text{тм1}}$ — дополнительные затраты, связанные с применением сложных и дорогих устройств телемеханики; $\Delta K_{\text{к1}}$ — стоимость дополнительной мощности конденсаторных батарей; $\Sigma K_{\text{р1}}$ — стоимость защитных реакторов; $M(Y_{\Sigma})$ — математическое ожидание ущерба вследствие повышенной аварийности в кабельных сетях, системах релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи; $I_{\text{п1}}$ — стоимость потерь электроэнергии в сети при отсутствии технических средств для снижения уровней гармоник; $I_{\text{пн}}$ — стоимость потерь электро-

Таблица 3

Расчетный случай	Формулы для определения коэффициента несинусоидальности	Погрешность, %	Примечание
Одиночный или группа согласованно работающих шестифазных вентильных преобразователей	$\frac{3}{\pi} \Delta U_* \sin \left(\alpha + \frac{\gamma}{2} \right) \sqrt{\frac{\gamma}{1 - \frac{\pi}{6} \Delta U_* \gamma \sin^2 \left(\alpha + \frac{\gamma}{2} \right) \left(\frac{\pi}{3} - \gamma \right)}}$	± 2	При выводе принято: $\sin \gamma \approx \gamma; \Delta U_* = \frac{x_c}{x_c + x_{\text{т}}}$
То же	$0,96 \Delta U_* \sin \left(\alpha + \frac{\gamma}{2} \right) \sqrt{\gamma}$	$+5$	где x_c и $x_{\text{т}}$ — сопротивления сети и трансформатора преобразователя;
То же	$\sqrt{0,053 \sin 3,75\gamma + 0,085 \sin 2,6\gamma [1 - \cos (2\alpha + \gamma)]}$	± 5	S_p (6ф) и т. д. — среднеквадратические значения полной мощности 6, 12, 24-фазных преобразователей;
То же, для 12-фазных преобразователей	$\frac{3\Delta U_*}{2\pi \sqrt{1 - 4\gamma \Delta U_* \sin^2 \left(\alpha + \frac{\gamma}{2} \right)}} \sqrt{0,014 \sin 6,4\gamma + \dots}$ $\rightarrow +0,0185 \sin 5,3\gamma [1 - \cos (2\alpha + \gamma)]$	± 10	x_q — сопротивление ветви нагрузки q-й секции (системы шин); $x_{\text{к}}$ — сопротивление короткого замыкания на шинах выпрямителя (печи)
Нереверсивные вентильные преобразователи	$\frac{\sqrt{3} x_q \sqrt{\sum_{p=1}^n k_{qp} I_{vp}}}{U_{\text{н}}}$	± 15 для 6-фазных схем	
Реверсивные вентильные преобразователи, коммутируемые по 6- или 12-фазным схемам	$\frac{x_q}{U_{\text{н}}^2} \sqrt{\sum_{p=1}^n k_{qp} [4S_{p(6ф)}^2 + 2S_{p(12ф)}^2 + \sqrt{2} S_{p(24ф)}^2]}$	± 25 для 12-фазных схем	
Сварочный выпрямитель, коммутируемый по мостовой схеме	$\frac{0,35 I_{\text{н}} x_{\text{к}}}{U_{\text{н}}}$	± 10	
Электродуговая сталеплавильная печь	$\frac{1 \div 1,25 I_{\text{н}} x_{\text{к}}}{U_{\text{н}}}$	± 15	

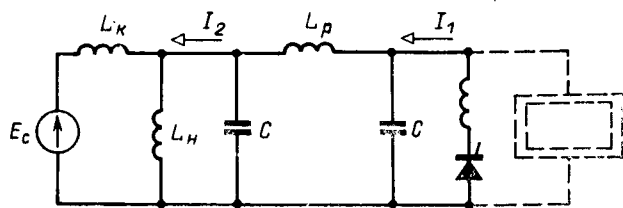


Рис. 1. Схема включения П-образного фильтра нижних частот.

энергии в сети при применении технических средств для снижения уровней гармоник, включая потери в этих устройствах; Δu_{a1} , $\Delta u_{т.р}$ — приращение удельных нормативных отчислений на амортизацию и текущий ремонт в условиях высокого уровня гармоник; $u_{a.н.}$, $u_{т.р.н.}$ — удельные нормативные отчисления на амортизацию и текущий ремонт технических средств для снижения уровней гармоник; $u_{тм}$, $u_{a.с}$ — суммарные удельные нормативные отчисления на реновацию, капитальный и текущий ремонт средств автоматики, телемеханики и связи; $u_{кн}$, $u_{р}$ — удельные нормативные отчисления от стоимости конденсаторов и реакторов.

В конкретных случаях в (19) те или иные слагаемые будут отсутствовать.

Расчеты показывают, что при применении резонансных фильтров в сетях 10 кВ непрерывных 6- и 7-клетевых прокатных станов экономия приведенных затрат составляет 60—70 тыс. руб. Установка резонансных фильтров на преобразовательных подстанциях крупной районной энергосистемы обуславливает экономии приведенных затрат в сумме 200—300 тыс. руб.

Таким образом, снижение уровней гармоник необходимо не только по техническим, но и по экономическим соображениям.

Методы снижения уровней гармоник. Снижение уровней гармоник в электросетях является частью общей задачи уменьшения влияния нелинейных нагрузок на питающую сеть и улучшения качества электрической энергии в этих сетях. Комплексное решение этой задачи оказывается в экономическом отношении более целесообразным, чем стабилизация отдельных показателей качества путем применения специализированных устройств. Примером таких многофункциональных устройств является управляемый реактор, разработанный в ЭНИН им. Кржижановского и предназначенный для ограничения влияния быстропеременных нагрузок на другие потребители. Такой реактор в комбинации с конденсаторами позволяет стабилизировать напряжения на секции шин и снизить уровень гармоник напряжения. Фильтры высших гармоник являются одновременно компенсирующими устройствами, так как конденсаторы на основной частоте генерируют в питающую сеть реактивную мощность. При определенных условиях такие фильтры могут использоваться также для симметрирования системы линейных напряжений в электросети.

Улучшение качества электроэнергии и, в частности, снижение уровней гармоник может быть осуществлено также путем рационального построения сети, например, реактированием нелинейных нагрузок, подключением параллельно этим нагрузкам синхронных двигателей или специальных синхронных компенсаторов, применением эквивалентных многофазных режимов вентильных преобразователей. Уменьшение искажений кривой сетевого тока преобразователей может быть обеспечено различными средствами: введением (инжекцией) токов тройной частоты в цепь преобразователя [Л. 11], компенсацией гармоник магнитного потока трансформаторов преобразователей [Л. 12], последовательным включением преобразователей, применением преобразователей с поочередным управлением, использованием широтно-импульсного управления вместо фазового и др.

Применение первых трех способов ограничивается установками малой мощности, так как связано с существенным усложнением и удорожанием схемы преобразователя. Широтно-импульсное управление применяется для мощных термических установок, оборудованных тиристорными ключами. При поочередном управлении наряду с уменьшением потребления реактивной мощности имеет место снижение уровня гармоник. С этой точки зрения схема с поочередным управлением группами вентилей оказывается эквивалентной 12-фазной схеме. Наибольшее применение в силу отмеченных выше достоинств находят индуктивно-емкостные фильтры; применение их спо-

собствует также повышению надежности работы преобразователей в инверторных режимах. Фильтры могут устанавливаться либо для разделения линейных и нелинейных нагрузок (заградительные фильтры), либо для шунтирования (поглощения) тока высших гармоник. Рассмотрим целесообразность применения фильтров различных типов.

Разделение линейных и нелинейных нагрузок может осуществляться с помощью фильтров низших частот (ФНЧ) либо полосовых фильтров; последние более сложны, чем ФНЧ, поэтому далее применение их рассматривать не будем.

Простейшим ФНЧ является Г-образный фильтр, контур которого образуется индуктивностью трансформатора преобразователя (электродуговой печи) и емкостью батареи конденсаторов, подключенной к шинам подстанции. Во избежание резонансных повышений напряжения на частотах гармоник резонансная частота контура сеть — батарея должна быть меньше частоты гармоники наименьшего порядка из содержащихся в амплитудном спектре тока (э. д. с.) нелинейной нагрузки. Отношение сопротивлений батареи и сети для v -й гармоники

$$x_{св}/x_{нв} = S_{к}/Qv^2. \quad (20)$$

Обычно отношение мощности короткого замыкания за питающим трансформатором к мощности трансформатора находится в пределах:

$$S_{к}/S_{тр} = 5 \div 10. \quad (21)$$

Обозначим отношение токов v -й гармоники после фильтра и до фильтра следующим образом:

$$k = \frac{I_{2v}}{I_{1v}}$$

С помощью (20) и (21) соотношение между мощностью питающего трансформатора и реактивной мощностью батареи, при котором обеспечивается заданное (желаемое) значение коэффициента k , записывается в виде:

$$\frac{Q_{св}}{S_{тр}} = \frac{(5 \div 10) S_{тр} (1 - k)}{kv^2}. \quad (22)$$

Последнее выражение позволяет заключить, что для эффективного снижения уровней гармоник с помощью Г-образного фильтра требуется мощность батареи конденсаторов того же порядка, что и мощность питающего трансформатора. Очевидно, что такое решение нерационально. Аналогичный результат получается и при использовании мостовых ФНЧ. В рассматриваемом случае применение Т-образного фильтра менее целесообразно, чем П-образного, так как Т-образный фильтр менее надежен из-за наличия двух последовательно включенных реакторов. Кроме того, входное сопротивление Т-образного фильтра на частотах гармоник относительно невысокого порядка больше, чем П-образного, поэтому искажения кривой напряжения на зажимах нелинейной нагрузки будут также большими. В связи с этим далее будем рассматривать П-образные ФНЧ (рис. 1).

При определении параметров реакторов и конденсаторов фильтров пренебрежем активными сопротивлениями фильтра и сети. Передаточная функция схемы рис. 1 по току

$$I(p) = \frac{i_2(p)}{i_1(p)} = \frac{1}{p^2 C^2 L_n L + p^2 C (L + 2L_n) + 1}; \quad (23)$$

$$k = \frac{I_2}{I_1} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{x_p x_n}{x_c^2}} + \sqrt{1 + \frac{x_p + 2x_n}{x_c}}}, \quad (24)$$

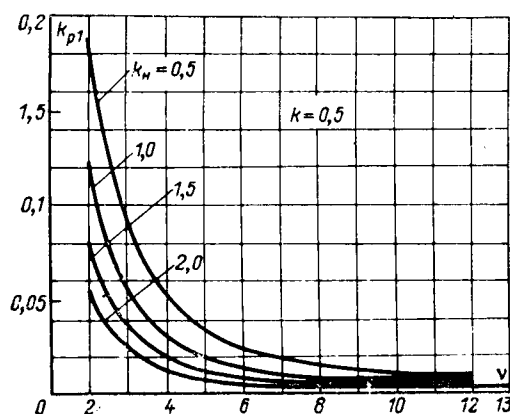
где x_p , x_n , x_c — реактивные сопротивления реактора фильтра, нагрузки и поперечного плеча фильтра.

Обозначив $\frac{x_p}{x_n} = k_n$ и $\frac{x_n}{x_c} = k_{p1}$, выражение для k_{p1} при заданном (желаемом) значении коэффициента k найдем из уравнения (24):

$$k_{p1} = -\frac{k_n v^2}{2(k_n v^2 + 2)} + \sqrt{\frac{1 - k}{\alpha(k_n v^2 + 2)v^2} + \left[\frac{k_n}{2(k_n v^2 + 2)}\right]^2}, \quad (25)$$

для $k_n = 1$, $k = 0,5$ и $v = 0,5$ $k_{p1} = 0,025$. Следовательно, суммарная мощность батарей фильтра

$$Q_{св} = 2 \cdot 0,025 (5 \div 10) S_{тр} = (0,25 \div 0,5) S_{тр}. \quad (26)$$

Рис. 2. Графики функции $k_{p1}(v)$.

Таким образом, как и в случае Г-образного фильтра, для эффективного снижения уровней гармоник напряжения в сети требуется установленная мощность батарей конденсаторов, близкая к мощности питающего трансформатора.

На рис. 2 представлен график $k_{p1}(v)$ для $k=0,5$ при различных k_n , наглядно иллюстрирующий это положение. Отметим, что применение несимметричного П-образного фильтра приводит к незначительному уменьшению мощности батарей конденсаторов [Л. 9]. П-образный ФНЧ с регулируемым реактором позволяет регулировать напряжение промышленной частоты на шинах нелинейной нагрузки. Для вентильной нагрузки глубина регулирования реактора должна быть равна 5÷6 [Л. 9].

В рассматриваемом случае могут быть применены реакторы с поперечным подмагничиванием или трехфазные реакторы с вращающимся магнитным полем. П-образные ФНЧ с регулируемым реактором могут найти применение на мощных преобразовательных подстанциях в случае, когда имеется значительный дефицит реактивной мощности и требуется регулирование напряжения на шинах преобразователей. Для фильтрации гармоник в широком спектре частот используются устройства на основе схем реактивных многоэлементных двухполюсников, подключаемые к шинам подстанций. Соответствующие схемы фильтров могут быть синтезированы по желаемым частотным характеристикам сети по методу Фостера или Каузера в виде последовательно или параллельно соединенных одноили двухэлементных двухполюсников либо в виде цепных схем; возможны и более сложные схемы.

При параллельном соединении LC-цепей, настроенных на частоты отдельных гармоник, реализуется цепочечный резонансный фильтр. Дефицит реактивной мощности на шинах подстанции в этом случае может быть полностью покрыт с помощью батарей конденсаторов фильтров; причем, установленная мощность конденсаторов используется на 80–90% [Л. 5]. В остальных случаях имеет место значительное уменьшение надежности фильтра вследствие большого числа последовательно-параллельных ветвей; установленная мощность конденсаторов используется в малой мере; такое решение является неэкономичным. Таким образом, резонансные LC-фильтры являются наиболее простыми и экономичными фильтрами энергетического назначения.



Выводы. 1. Рост установленных мощностей вентильных преобразователей, электродуговых печей, электросварочных установок и других нелинейных нагрузок приводит к существенному ухудшению качества электроэнергии в сетях энергосистем и промышленных предприятий вследствие появления значительных величин гармоник тока и напряжения, отрицательно влияющих на работу электрооборудования, систем автоматики, релейной защиты, телемеханики и связи. В связи с этим существует необходимость комплексного решения проблемы высших гармоник в электроэнергетике.

2. Анализ ущерба, обусловленного отрицательным влиянием гармоник на электроустановки, позволяет заключить, что необходимость снижения уровней гармоник определяется не только техническими, но и экономическими соображениями.

3. При выборе технических средств для снижения уровней гармоник следует отдавать предпочтение многофункциональным устройствам, позволяющим одновременно улучшить несколько показателей качества электрической энергии. Локализация гармоник с помощью резонансных фильтров, конденсаторы которых являются источниками реактивной мощности, целесообразна в техническом и экономическом отношении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васютинский С. Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. М., «Энергия», 1970, 432 с.
2. Долгинов А. И. Техника высоких напряжений. М., «Энергия», 1968, 464 с.
3. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения металлургических заводов. — «Электричество», 1972, № 11, с. 53–58.
4. Жежеленко И. В., Шевцов К. К. Высшие гармоники, генерируемые установками дуговой электросварки. — «Электричество», 1973, № 3, с. 84–87.
5. Жежеленко И. В. Силовые фильтры высших гармоник в системах электроснабжения металлургических заводов. — В кн.: Инструктивные указания по проектированию электро-технических промышленных установок. М., «Энергия», 1972. № 4, с. 3–9.
6. Либкинд М. С. Высшие гармоники, генерируемые трансформаторами. Изд-во АН СССР, 1962, 98 с.
7. Пфайлер Ф. Компенсация реактивной мощности и фильтрация высших гармоник в преобразовательных установках. — «Электричество», 1968, № 4, с. 30–34.
8. Ренне В. Т., Багалеи Ю. В., Фридрих И. Д. Расчет и конструирование конденсаторов. Киев, «Техника», 1966, 325 с.
9. Сорокин В. М. Частотные фильтры для электрической сети. — В сб.: Вопросы ограничения токов коротких замыканий и высших гармоник в электрических сетях. М., Изд. ЭНИН, 1973.
10. Турбогенераторы. Расчет и конструкция. М., «Энергия», 1967, 895 с. Авт.: Титов В. В., Хуторецкий Г. М., Загородная Г. П. и др.
11. Bird B. M., March J. F., McLellan P. R. Harmonic reduction in multiplex converters by triple-frequency current injection. — «Proc. Inst. Electr. Engrs.», 1969, 116, № 10.
12. Sasaki H., Machida T. A new method to eliminate a. c. harmonic currents by magnetic flux compensation. — «IEEE Trans. Power Apparatus and Systems», 1971, 90, № 5.

[5.8.1974]

УДК 621.316.1.001.24.003.1

Распределение допустимой потери напряжения в электрических сетях из условия минимальных приведенных затрат

Проф. ВИНОВСЛАВСКИЙ В. Н.

Киевский политехнический институт

При проектировании электрических распределительных сетей выбор оптимального варианта базируется на рассмотрении и сравнении возможных вариантов их выполнения по экономическим и техническим показателям. В связи с отсутствием обоб-

щенных математических решений задачи по определению оптимальных сечений проводов и кабелей с одновременным учетом экономических и технических требований, предъявляемых к электрической сети как единому целому, в практике проектиро-

вания обычно применяются упрощенные методы расчета сетей. Получаемые при этом решения носят частный характер и в значительной степени зависят от опыта проектирующих инженеров.

Так, классические методы расчета распределительных сетей на постоянство сечений в отдельных линиях, постоянство плотности тока и минимальный общий расход металла приемлемы только для расчета сетей, которые характеризуются одинаковым конструктивным выполнением, применением одинакового проводникового материала, неизменностью годового числа часов использования максимальной мощности и выполнены при одном напряжении. Кроме того, эти методы расчета обладают общим принципиальным недостатком — они обеспечивают либо снижение расходов или стоимости проводниковых материалов, либо снижение потерь мощности или энергии, в то время как основным экономическим критерием любой электрической сети должен являться уровень приведенных затрат, который учитывает рациональное соотношение между расходом цветного металла и потерями электроэнергии.

В настоящее время наивыгоднейшие сечения проводов и жил кабелей с экономической точки зрения определяются по экономическим плотностям тока, которые регламентируются соответствующими директивными указаниями. Однако выбор сечений проводов по нормативным значениям экономических плотностей тока дает весьма приближенные решения, что неоднократно отмечалось многими авторами. Особенно большие погрешности имеют место в неоднородных электрических сетях [Л. 1], а также в тех случаях, когда выбранные сечения по нормированным значениям плотности тока необходимо увеличивать на отдельных участках сети с учетом накладываемых ограничений допустимой потерей напряжения. Так как выбранные сечения увеличиваются в произвольных линиях сети без каких-либо дальнейших технико-экономических обоснований, то рассчитанная таким образом сеть не удовлетворяет минимуму приведенных затрат.

Более достоверные значения экономических сечений проводов и жил кабелей позволяет определить расчет сетей по экономическим интервалам

[Л. 2]. Такой расчет учитывает конкретные характеристики линий электропередачи и особенности электропотребления (время максимальных потерь, стоимость электроэнергии, амортизационные отчисления). Однако при выборе сечений проводов по экономическим интервалам, так же как и по нормированным значениям плотностей тока, не учитываются взаимные влияния различных линий сети на суммарные затраты, разветвленность сети, а также накладываемые ограничения по допустимой потере напряжения. Поэтому целесообразно пользоваться таким методом расчета, который учитывал бы как конкретные особенности электрической сети, так и налагаемые ограничения по допустимой потере напряжения, и при этих условиях всегда обеспечивал бы минимальный уровень приведенных затрат.

Приведенные затраты в произвольной линии l_{kji} электрической сети в зависимости от активной составляющей потери напряжения ΔU_{kji} можно представить как [Л. 1]

$$Z_{kji} = (E_n + p_{kji}) b_{kji} \frac{\rho_{kji} l_{kji}^2 P_{kji}}{10 U_{kji}^2 \Delta U_{kji}} + \frac{\tau_{kji} \beta_{kji} P_{kji} \Delta U_{kji}}{100 \cos^2 \varphi_{kji}}, \quad (1)$$

где индексы k, j, i обозначают соответственно произвольные значения узла сети, линии с последующим разветвлением и неразветвляющейся линии сети; E_n — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений; p_{kji} — отчисления на амортизацию, ремонт и обслуживание линии, %; b_{kji} — коэффициент, учитывающий изменение стоимости рассматриваемой линии сети в зависимости от сечения, руб/(мм²·км); P_{kji} — максимальное значение передаваемой мощности, кВт; ρ_{kji} — удельное сопротивление проводникового материала, ом·мм²/км; τ_{kji} — время максимальных потерь; β_{kji} — стоимость электроэнергии, руб/кВт·ч.

Из (1) следует, что при заданных значениях напряжений U_{kji} , длинах линий сети l_{kji} , передаваемых мощностях P_{kji} , а также при известных параметрах ρ_{kji} , P_{kji} , τ_{kji} , ρ_{kji} , b_{kji} , E_n приведенные затраты зависят только от потери напряжения ΔU_{kji} .

Обозначив

$$(E_n + p_{kji}) b_{kji} \frac{\rho_{kji} l_{kji}^2 P_{kji}}{10 U_{kji}} = A_{kji}; \quad (2)$$

$$\frac{\tau_{kji} \beta_{kji} P_{kji}}{100 \cos^2 \varphi_{kji}} = B_{kji}, \quad (3)$$

уравнение (1) можно записать в виде:

$$Z_{kji} = \frac{A_{kji}}{\Delta U_{kji}} + B_{kji} \Delta U_{kji}. \quad (4)$$

Минимальные приведенные затраты в произвольной линии сети будут при условии

$$\frac{\partial Z_{kji}}{\partial \Delta U_{kji}} = -\frac{A_{kji}}{\Delta U_{kji}^2} + B_{kji} = 0. \quad (5)$$

Из (5) потеря напряжения, которая соответствует минимальным приведенным затратам и называется в дальнейшем экономической потерей напряжения

$$\Delta U_{эkj} = \sqrt{\frac{A_{kji}}{B_{kji}}}. \quad (6)$$

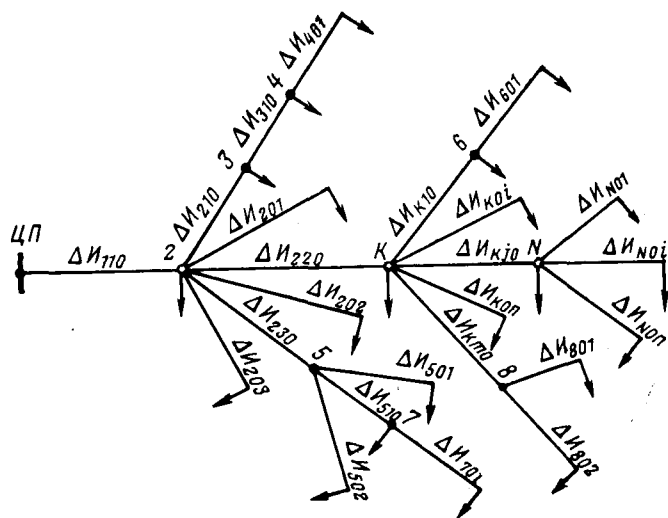


Рис. 1.

С учетом значений A_{kji} и B_{kji} экономическая потеря напряжения

$$\Delta U_{\text{э}kji} = \frac{l_{kji} \cos \varphi_{kji}}{U_{kji}} \sqrt{\frac{(E_{\text{н}} + p_{kji}) b_{kji} \rho_{kji} \cdot 10}{\tau_{kji} \beta_{kji}}}. \quad (7)$$

Подставляя значение экономической потери напряжения из (6) в (4), можно определить минимальные приведенные затраты для произвольной линии сети:

$$Z_{kji \text{ min}} = 2 \sqrt{A_{kji} B_{kji}} \quad (8)$$

или

$$Z_{kji \text{ min}} = \frac{2 l_{kji} p_{kji}}{U_{kji} \cos \varphi_{kji}} \sqrt{(E_{\text{н}} + p_{kji}) \rho_{kji} \beta_{kji} \tau_{kji} b_{kji} \cdot 10^{-3}}. \quad (9)$$

Для электрической сети с любой степенью разветвленности (рис. 1) суммарные приведенные затраты

$$Z = \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^{m_k} \sum_{i=1}^{n_k} \left(\frac{A_{kji}}{\Delta U_{kji}} + B_{kji} \Delta U_{kji} \right), \quad (10)$$

где N — количество узлов сети; m_k — количество линий сети, отходящих от k -го узла с последующим разветвлением; n_k — количество неразветвляющихся линий, отходящих от k -го узла сети.

При $j=0$ получаем приведенные затраты на разветвляющихся линиях сети, отходящих от k -го узла, а при $i=0$ получаем приведенные затраты в разветвляющихся линиях сети, отходящих от k -го узла.

Уравнение (10) можно представить как сумму из приведенных затрат в первой разветвляющейся линии l_{110} и приведенных затрат во всех остальных линиях сети:

$$Z = \frac{A_{110}}{\Delta U_{110}} + B_{110} \Delta U_{110} + \sum_{k=2}^N \sum_{j=1}^{m_k} \sum_{i=1}^{n_k} \left(\frac{A_{kji}}{\Delta U_{kji}} + B_{kji} \Delta U_{kji} \right). \quad (11)$$

Если заменить значения переменных ΔU_{kji} новыми переменными $\Delta U'_{kji}$, которые связаны между собой зависимостью:

$$B_{kji} \Delta U_{kji} = B_{110} \Delta U'_{kji}, \quad (12)$$

то уравнение (11) принимает вид:

$$Z = \frac{A_{110}}{\Delta U'_{110}} + B_{110} \Delta U'_{110} + \sum_{k=2}^N \sum_{j=1}^{m_k} \sum_{i=1}^{n_k} \left(\frac{A_{kji} B_{kji}}{B_{110} \Delta U'_{kji}} + B_{110} \Delta U'_{kji} \right). \quad (13)$$

Потерю напряжения $\Delta U'_{110}$ можно представить как разность между допустимой потерей напряжения на всю сеть $\Delta U_{\text{д}}$ и суммой потерь напряжения $\Sigma \Delta U'_{kji}$ в последовательно соединенных линиях от первой узловой точки к конечным точкам сети, т. е.

$$\Delta U'_{110} = \Delta U_{\text{д}} - \Sigma \Delta U'_{kji}. \quad (14)$$

С учетом (14) приведенные затраты

$$Z = \frac{A_{110}}{\Delta U_{\text{д}} - \Sigma \Delta U'_{kji}} + B_{110} (\Delta U_{\text{д}} - \Sigma \Delta U'_{kji}) +$$

$$+ \sum_{k=2}^N \sum_{j=1}^{m_k} \sum_{i=1}^{n_k} \left(\frac{A_{kji} B_{kji}}{B_{110} \Delta U'_{kji}} + B_{110} \Delta U'_{kji} \right). \quad (15)$$

Суммарные приведенные затраты по всей сети имеют минимальное значение при условии

$$\frac{\partial Z}{\partial \Delta U'_{kji}} = \frac{A_{110}}{(\Delta U_{\text{д}} - \Sigma \Delta U'_{kji})^2} - B_{110} - \frac{A_{kji} B_{kji}}{B_{110} (\Delta U'_{kji})^2} + B_{110} = 0, \quad (16)$$

откуда

$$\frac{A_{110}}{(\Delta U_{\text{д}} - \Sigma \Delta U'_{kji})^2} = \frac{A_{kji} B_{kji}}{B_{110} (\Delta U'_{kji})^2}. \quad (17)$$

С учетом (12) и (14) после некоторых преобразований равенство (17) принимает вид:

$$\Delta U_{110} \sqrt{\frac{B_{110}}{A_{110}}} = \Delta U_{kji} \sqrt{\frac{B_{kji}}{A_{kji}}} \quad (18)$$

или

$$\frac{\Delta U_{110}}{\Delta U_{\text{э}110}} = \frac{\Delta U_{kji}}{\Delta U_{\text{э}kji}}. \quad (19)$$

Из (19) следует, что отношение искомой потери напряжения ΔU_{kji} к экономическому значению $\Delta U_{\text{э}kji}$ в любой линии сети есть величина постоянная, т. е.

$$\frac{\Delta U_{kji}}{\Delta U_{\text{э}kji}} = C. \quad (20)$$

Зная постоянную C , можно определить потерю напряжения в произвольной линии любой разветвленной или неразветвленной электрической сети из выражения

$$\Delta U_{kji} = C \Delta U_{\text{э}kji}. \quad (21)$$

Постоянную C можно определить по допустимой потере напряжения, равной сумме потерь напряжения в последовательно соединенных линиях от питающего пункта к конечной точке сети в том направлении, в котором эта сумма имеет наибольшее значение [Л. 3], т. е.

$$\Delta U_{\text{д}} = (\Sigma \Delta U_{kji})_{\text{max}} = C (\Sigma \Delta U_{\text{э}kji})_{\text{max}}, \quad (22)$$

откуда

$$C = \frac{\Delta U_{\text{д}}}{(\Sigma \Delta U_{\text{э}kji})_{\text{max}}}. \quad (23)$$

С учетом значения C из (23) потеря напряжения в произвольной линии сети

$$\Delta U_{kji} = \Delta U_{\text{д}} \frac{\Delta U_{\text{э}kji}}{(\Sigma \Delta U_{\text{э}kji})_{\text{max}}}. \quad (24)$$

Если подставить в (24) значение экономической потери напряжения из (7), то выражение для определения потери напряжения в произвольной линии разветвленной сети из условия минимальных приведенных затрат при допустимой потере напряжения $\Delta U_{\text{д}}$ принимает следующий вид:

$$\Delta U_{kji} = \Delta U_{\text{д}} \frac{\frac{l_{kji} \cos \varphi_{kji}}{U_{kji}} \sqrt{\frac{(E_{\text{н}} + p_{kji}) b_{kji} \rho_{kji}}{\tau_{kji} \beta_{kji}}}}{\left[\sum \frac{l_{kji} \cos \varphi_{kji}}{U_{kji}} \sqrt{\frac{(E_{\text{н}} + p_{kji}) b_{kji} \rho_{kji}}{\tau_{kji} \beta_{kji}}} \right]_{\text{max}}}. \quad (25)$$

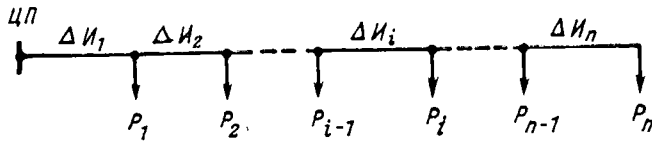


Рис. 2.

Для электрических сетей с одинаковыми значениями U_{kji} , τ_{kji} , ρ_{kji} , β_{kji} во всех линиях

$$\Delta U_{kji} = \Delta U_{\text{д}} \frac{l_{kji} \cos \varphi_{kji} \sqrt{(E_{\text{н}} + p_{kji}) b_{kji}}}{[\sum l_{kji} \cos \varphi_{kji} \sqrt{(E_{\text{н}} + p_{kji}) b_{kji}}]_{\text{max}}} \quad (26)$$

При одинаковых значениях для всех линий сети также амортизационных отчислений ρ_{kji} и коэффициента удорожания b_{kji}

$$\Delta U_{kji} = \Delta U_{\text{д}} \frac{l_{kji} \cos \varphi_{kji}}{(\sum l_{kji} \cos \varphi_{kji})_{\text{max}}} \quad (27)$$

Анализ выражений (24) — (27) показывает, что для построения сети с минимальными приведенными затратами допустимая потеря напряжения в этой сети должна распределяться между отдельными линиями пропорционально экономическим потерям напряжения на соответствующих участках.

По найденным значениям потерь напряжения ΔU_{kji} можно определить сечения проводов, соответствующие минимуму суммарных приведенных затрат и принятой допустимой потере напряжения в сети:

$$F_{kji} = \frac{\rho_{kji} l_{kji} P_{kji}}{10 U_{\text{н}}^2 \Delta U_{kji}} \quad (28)$$

В частном случае, когда электрическая сеть является неразветвленной и состоит из n последовательно соединенных линий (рис. 2), допустимая потеря напряжения

$$\Delta U_{\text{д}} = \sum_{i=1}^n \Delta U_i = C \sum_{i=1}^n \Delta U_{\text{зи}}, \quad (29)$$

где i — произвольный участок неразветвленной сети.

При этом постоянная

$$C = \frac{\Delta U_{\text{д}}}{\sum_{i=1}^n \Delta U_{\text{зи}}} = \frac{\Delta U_{\text{д}}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{A_i}{B_i}}}, \quad (30)$$

а потери напряжения на произвольном участке неразветвленной сети

$$\Delta U_i = \Delta U_{\text{д}} \frac{\Delta U_{\text{зи}}}{\sum_{i=1}^n \Delta U_{\text{зи}}} = \Delta U_{\text{д}} \frac{\sqrt{\frac{A_i}{B_i}}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{A_i}{B_i}}} \quad (31)$$

С учетом значений $\Delta U_{\text{зи}}$ или A_i и B_i потеря напряжения

$$\Delta U_i = \Delta U_{\text{д}} \frac{l_i \cos \varphi_i \sqrt{(E_{\text{н}} + p_i) b_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{l_i \cos \varphi_i}{U_i} \sqrt{(E_{\text{н}} + p_i) b_i}} \quad (32)$$

В неразветвленных сетях, в которых ряды расчетных параметров являются одинаковыми на всех участках, выражение (32) значительно упрощается, в частности при одинаковых значениях U_i , τ_i , ρ_i , β_i , P_i , b_i ,

$$\Delta U_i = \Delta U_{\text{д}} \frac{l_i \cos \varphi_i}{\sum_{i=1}^n l_i \cos \varphi_i} \quad (33)$$

Экономическое сечение проводов на произвольном участке неразветвленной сети, соответствующее потере напряжения ΔU_i ,

$$F_{\text{зи}} = \frac{\rho P_i \sum_{i=1}^n l_i \cos \varphi_i}{10 U_{\text{н}}^2 \Delta U_{\text{д}} \cos \varphi_i} = \frac{\rho S_i \sum_{i=1}^n l_i \cos \varphi_i}{10 U_{\text{н}}^2 \Delta U_{\text{д}}} \quad (34)$$

Выражение (34) позволяет непосредственно определять сечения проводов и жил кабелей на различных участках неразветвленной сети из условия минимума приведенных затрат при наличии ограничения по потере напряжения $\Delta U_{\text{д}}$.

Выводы. 1. Предлагаемый метод расчета электрических распределительных сетей обеспечивает минимизацию основного экономического критерия — приведенных затрат при выборе сечений проводов и жил кабелей по допустимой потере напряжения.

2. Выведенные зависимости позволяют рассчитывать распределительные сети с учетом конкретных характеристик линий электропередачи и взаимного влияния всех линий на суммарные приведенные затраты при любой степени разветвленности сети.

3. Для расчета распределительных сетей по изложенному методу можно широко применять вычислительные машины без многочисленных повторяемых вычислений, которые производятся в настоящее время при выборе оптимальных сечений проводов путем постепенных поисков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Винославский В. Н. Определение сечений проводов и кабелей шахтных электрических сетей из условия минимальных расчетных затрат. — «Изв. вузов СССР. Горный журнал», 1969, № 9.

2. Веников В. А., Астахов Ю. Н. Экономические интервалы при выборе оптимальных вариантов энергетических объектов и их применение при технико-экономических расчетах электропередач. — «Энергетика и автоматика», 1962, № 3.

3. Винославский В. Н., Шишков В. З. Расчет неоднородных распределительных электрических сетей из условия минимальных приведенных затрат. — «Электричество», 1971, № 2.

[12.3.1974]



К численным методам управления суточными режимами энергосистем с учетом нестационарных процессов в нижнем бьефе ГЭС

Канд. техн. наук ШАХВЕРДЯН С. В.

АрмНИИ энергетики

Необходимость учета нестационарных процессов в нижнем бьефе ГЭС при разработке оптимального управления режимами энергосистем диктуется следующими положениями: во-первых, в ряде случаев повышается экономическая эффективность работы системы в целом; во-вторых, нельзя выдержать ограничения типа неравенств на уровень нижнего бьефа ГЭС, если задачу оптимизации решить без учета нестационарных процессов, так как в этом случае уровень нижнего бьефа становится неуправляемым; в-третьих, нельзя рассматривать суточную оптимизацию режимов энергосистем с ГЭС, колебания напоров которых из-за изменения уровня нижнего бьефа ГЭС значительны, пользуясь стационарными кривыми зависимостей, так как значения их, вычисленные по стационарным кривым и по уравнениям нестационарного процесса, значительно расходятся. Если первое положение в некоторых случаях может быть несущественным¹, то второе и третье для современных энергосистем весьма существенны.

Рассматриваемая задача ранее исследовалась в основном на уровне необходимых условий оптимальности, причем без учета ограничений типа неравенств как на уровень нижнего бьефа ГЭС, так и на управляющие параметры. Среди них заслуживают внимания публикации [Л. 1 и 2], отличающиеся математической строгостью. Наибольший интерес представляет публикация [Л. 3], где в развитие [Л. 2] приводятся метод и численный алгоритм оптимизации суточных режимов энергосистем с гидроэлектростанциями при учете нестационарных процессов, ограничений на уровень нижнего бьефа ГЭС как по абсолютной величине, так и по амплитуде колебания на интервале, равном одним суткам. Алгоритм построен на методах сопряженных градиентов и штрафных функций, учитывающих ограничения на уровень нижнего бьефа. При этом нестационарный процесс в нижнем бьефе ГЭС описан уравнением вида «экспоненты со скачком».

В статье в развитие идей [Л. 4] дается решение с численным алгоритмом, многократно испытанным на «Урал-14Д», задачи оптимального управления суточными режимами энергосистем с учетом нестационарных процессов, ограничений на уровень нижнего бьефа как по абсолютной величине, так и по амплитуде колебания и на управляющие параметры. Причем допустимая область управления по гидроэлектростанциям принимается зависящей от уровня нижнего бьефа, что наиболее близко подходит к условиям эксплуатации станции.

Ограничения типа неравенств на уровень нижнего бьефа ГЭС учитываются по методу интегральных штрафных функций (ИШФ). Использование метода ИШФ в сочетании с принципом максимума позволяет организовать единую вычислительную процедуру для выбора начальных значений сопряженных уравнений гамильтоновой системы, множителей Лагранжа и штрафных коэффициентов. В настоящее время задачи оптимизации динамических систем с ограниченными фазовыми координатами, к классу которых относится рассматриваемая задача, разработаны в основном в теоретическом плане, что же касается численных методов их решения, то здесь наблюдается значительное отставание.

Теоретические разработки относительно учета ограничений по амплитуде колебания фазовых координат почти отсутствуют. В статье для учета ограничений по амплитуде колебания уровня нижнего бьефа ГЭС вводится параметр, благодаря чему становится возможным сведение этого рода ограничений к обычным видам.

Постановка задачи. Допустим, что в электроэнергетической системе имеются m тепловых и n гидравлических электростанций. Требуется найти такие вектор-функции $\bar{P}_T = (P_{1T}, \dots, P_{mT})$ и $\bar{u} = (u_1, \dots, u_n)$, которые минимизируют функционал

$$I = \int_{t_0}^T B(\bar{P}_T) dt \quad (1)$$

¹ В этом случае, как будет показано ниже, вычислительную процедуру в определенной степени можно сократить за счет допустимого понижения точности сходимости итерационного процесса.

при следующих ограничениях:

$$F = \sum_{j=1}^m P_{jT} + \sum_{i=1}^n [gu(h-x) - \Delta P(x, u)]_i - P_c(t) - \pi = 0 \quad (2)$$

(баланс активных мощностей энергосистем);

$$V_i = \int_{t_0}^T u_i(t) dt; \quad (3)$$

$$P_{jT}^0 \leq P_{jT} \leq P_{jT}^*, \quad u_i^0 \leq u_i \leq u_i^*; \quad (4)$$

$$x_i^0 \leq x_i \leq x_i^*; \quad (5)$$

$$b_{iH}^* - b_i^0 \leq A_i, \quad b_{iH}^* - b_i^0 \leq A_i \quad (6)$$

и дифференциальных уравнениях, описывающих нестационарный процесс в нижнем бьефе ГЭС,

$$\ddot{x}_i + d_{i1}\dot{x}_i + d_{i2}x_i + d_{i3} = d_{i4}u_i \quad (7)$$

с начальными условиями

$$x_i(t_0) = c_i^1, \quad \dot{x}_i(t_0) = c_i^2, \quad (8)$$

где B — расход топлива по энергосистеме за единицу времени; P_{jT} — мощность j -й тепловой станции ($j=1, \dots, m$); g — постоянный коэффициент; u_i — расход воды через i -ю ГЭС ($i=1, \dots, n$); h_i — уровень верхнего бьефа i -й ГЭС; x_i — уровень нижнего бьефа i -й ГЭС; ΔP_i — потери мощности в гидроблоке i -й ГЭС; P_c — суммарная активная нагрузка энергосистемы; π — потери активной мощности в электрических сетях; V_i — заданный объем воды, подлежащий расходованию на i -й ГЭС за период $(T-t_0)$; t_0 и T — соответственно начало и конец периода управления; A_i — максимально допустимая амплитуда колебания $x_i(t)$, заданное число;

$$b_{iH}^* = \max_{t \in [t_0, T]} x_i(t), \quad b_i^0 = \min_{t \in [t_0, T]} x_i(t);$$

$$b_{iH}^* = \max_{t \in [t_1, t_0]} x_i(t), \quad t_1 = t_0 - T;$$

d_{i1}, \dots, d_{i4} — постоянные коэффициенты; c_i^1, c_i^2 — заданные числа; индексами (0) и (*) обозначены минимально и максимально допустимые значения соответствующих величин.

Поскольку задача рассматривается в суточном аспекте, то $T=24$, $t_0=0$, следовательно, $t_1=-24$, что соответствует началу предшествующих суток. Так как b_{iH}^* равно максимальному значению $x_i(t)$ за предшествующие сутки, т. е. на интервале $[t_1, t_0]$, то его численное значение в момент $t=t_0$ будет известно. Во всех дальнейших построениях принимается $h_i = \text{const}$ ($i=1, \dots, n$), что для современных крупных плотинных ГЭС вполне реально, поскольку изменение уровня верхнего бьефа в течение суток, как правило, незначительно.

Обозначим $x_i = x_i^1$ и $\dot{x}_i = x_i^2$, тогда уравнение (7) можно заменить двумя уравнениями первого порядка:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_i^1 &= x_i^2 = f_i^1(x_i^1); \\ \dot{x}_i^2 &= d_{i4}u_i - d_{i1}x_i^2 - d_{i2}x_i^1 - d_{i3} = f_i^2(x_i^1, x_i^2, u_i). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Анализируя неравенства (5) и (6), можно заметить:

1. Если $x_i^* - x_i^0 \leq A_i$, тогда ограничение по амплитуде колебания уровня нижнего бьефа ГЭС, т. е. условие (6), выполняется автоматически. Следовательно, условие (6) из рассмотрения должно быть исключено и будет действовать только неравенство (5). Причем проверку условия $x_i^* - x_i^0 \leq A_i$ можно произвести до начала организации процесса решения задачи, так как x_i^* , x_i^0 , A_i — заранее известные числа.

2. Необходимость включения неравенства (6) в общую схему решения задачи для учета ограничения по амплитуде колебания $x_i(t)$ возникает при $x_i^* - x_i^0 > A_i$. Причем, если в

первом случае ($x_i^* - x_i^0 \leq A_i$) неравенство (6) вообще исключается из рассмотрения, то при $x_i^* - x_i^0 > A_i$, как будет показано ниже, неравенства (5) и (6) одновременно существовать не могут. Однако установить заранее, какое из неравенств (5) или (6) должно действовать, невозможно. Этот факт устанавливается в процессе решения задачи.

Для доказательства отмеченного рассмотрим неравенства (5) и (6), принимая $x_i^* - x_i^0 > A_i$. Из первого неравенства условия (6) вытекает $b_i^0 \geq b_{iн}^* - A_i$, что равносильно $x_i^1 \geq b_{iн}^* - A_i$. С другой стороны, из (5) следует $x_i^1 \geq x_i^0$, следовательно, $b_i^0 \geq x_i^0$. Нетрудно заметить, что эти два условия являются взаимоисключающими, поэтому их можно заменить одним неравенством:

$$x_i^1 \geq y_i, \quad y_i = \begin{cases} x_i^0, & \text{если } x_i^0 \geq b_{iн}^* - A_i; \\ b_{iн}^* - A_i, & \text{если } x_i^0 < b_{iн}^* - A_i. \end{cases} \quad (10a)$$

Поскольку $b_{iн}^*$, A_i , x_i^0 заранее известные числа, то значение y_i конкретно для каждой станции можно установить вполне определенно. Рассуждая аналогичным образом, можно записать:

$$x_i^1 \leq z_i, \quad z_i = \begin{cases} x_i^*, & \text{если } b_i^0 + A_i \geq x_i^*, \text{ где } b_i^0 \geq b_{iн}^* - A_i; \\ b_i^0 + A_i, & \text{если } b_i^0 + A_i < x_i^*, \text{ где } b_i^0 = b_{iн}^* - A_i. \end{cases} \quad (10b)$$

Когда же $b_i^0 > b_{iн}^* - A_i$ и $b_i^0 + A_i \leq x_i^*$, или $b_i^0 > x_i^0$ и $b_i^0 + A_i < x_i^*$, то в обоих случаях в рассмотрение должно быть введено только второе неравенство (6), т. е. $b_{iн}^* - b_i^0 \leq A_i$, так как при этом неравенство (5) будет выполняться всегда.

Обобщая изложенное и обозначая

$$E_{1i} = y_i - x_i^1 \leq 0; \quad (11)$$

$$E_{2i} = x_i^1 - z_i \leq 0; \quad (12)$$

$$E_{3i} = b_{iн}^* - b_i^0 - A_i \leq 0, \quad (13)$$

где $y_i = \begin{cases} x_i^0, & \text{если } x_i^* - x_i^0 \leq A_i; \\ \text{правой части (10a),} & \text{если } x_i^* - x_i^0 > A_i; \end{cases}$

$z_i = \begin{cases} x_i^*, & \text{если } x_i^* - x_i^0 \leq A_i; \\ \text{правой части (10b),} & \text{если } x_i^* - x_i^0 > A_i, \end{cases}$

получаем два (11) и (12) и одно (13) для каждой ГЭС взаимоисключающие неравенства.

Для учета ограничения типа (13) задачу несколько преобразуем, в результате чего (13) приведет к виду (11) и (12), удобному для дальнейшего решения. С этой целью введем параметр $x^A = (x_1^A, \dots, x_n^A)$, благодаря чему задача превращается в параметрическую. Тогда неравенство (13) можно заменить:

$$x_i^A - A_i \leq x_i^1 \leq x_i^A$$

или

$$E_{3i} = x_i^A - A_i - x_i^1 \leq 0; \quad (14)$$

$$E_{4i} = x_i^1 - x_i^A \leq 0. \quad (15)$$

При этом, как известно [Л. 5], к системе (9) необходимо добавить n уравнений вида

$$\dot{x}_i^A = 0, \quad i = 1, \dots, n. \quad (16)$$

Для включения в общую схему решения задачи неравенства (11), (12), (14) и (15) вводятся дополнительно к (9) системы уравнений

$$\dot{x}_{n+i}^k = \frac{1}{2} E_{ki}^2 D(E_{ki}) = f_{n+i}^k(x_i^1), \quad (17)$$

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

$$\dot{x}_{n+i}^3 = \frac{1}{2} \sum_{d=3}^4 E_{di}^2 D(E_{di}) = f_{n+i}^3(x_i^1, x_i^A, A_i); \quad (18)$$

$$x_{n+i}^k(t_0) = 0, \quad x_{n+i}^k(T) = \frac{1}{2} \int_{t_0}^T E_{ki}^2 D(E_{ki}) dt; \quad (19)$$

$$x_{n+i}^3(t_0) = 0, \quad x_{n+i}^3(T) = \frac{1}{2} \int_{t_0}^T \sum_{d=3}^4 E_{di}^2 D(E_{di}) dt, \quad (20)$$

где

$$D(E) = \begin{cases} 0, & \text{если } E < 0; \\ 1, & \text{если } E > 0. \end{cases}$$

Метод учета ограничений типа (11), (12), (14) и (15) уравнениями (17) и (18) естественно назвать методом интегральных штрафных функций (ИШФ), который в принципе находится в аналогии с методом Чэнга [Л. 6].

Учет ограничений на управляющие параметры $P_{jт}$ и u_i [неравенства (4)] можно организовать разными методами, например, Валентайна, Куна — Таккера, штрафных функций различных форм (квадратичные, логарифмические, обратные и т. д.) [Л. 7]. Здесь для учета ограничений (4) пользуемся методом Валентайна, а в приложении к этой конкретной задаче доказывается полное совпадение методов Валентайна и Куна — Таккера на уровне необходимых условий.

Согласно методу Валентайна необходимо ввести следующие уравнения:

$$R_{jт} = (P_{jт}^* - P_{jт}) (P_{jт} - P_{jт}^0) - \alpha_{jт}^2 = 0; \quad (21a)$$

$$R_{iт} = [u_i^*(x_i^1) - u_i] (u_i - u_i^0) - \alpha_{iт}^2 = 0, \quad (21b)$$

равносильные неравенствам (4), где $\alpha_{jт}$ и $\alpha_{iт}$ — дополнительные вещественные переменные [Л. 8].

Для окончательного решения задачи, естественно, необходимо иметь значения уровня нижнего бьефа и его скорости изменения во времени в момент $t = T$, т. е. условия на правом конце траекторий $x_i^k(t)$, ($i = 1, \dots, n$; $k = 1, 2$). Концы траекторий здесь принимаются свободными. Такое предположение при фиксированном T является наиболее реальным и целесообразным с точки зрения эксплуатации системы. В этой связи важно отметить, что определение периода управления $T - t_0$, т. е. значения T представляет предмет особых исследований, поскольку $T - t_0$ не всегда должно быть равно одним суткам даже тогда, когда задача решается при постоянном напоре ГЭС.

Решение задачи. Пользуясь методом множителей Лагранжа, интеграл (1) можно заменить выражением:

$$I^* = \int_{t_0}^T B^* dt, \quad (22)$$

где

$$B^* = B - \mu F - \sum_{j=1}^m \Omega_{jт} R_{jт} - \sum_{i=1}^n \Omega_{iт} R_{iт} + \sum_{i=1}^n \gamma_i u_i;$$

μ , $\Omega_{jт}$, $\Omega_{iт}$, γ_i — множители Лагранжа.

Для симметрии последующих выкладок обозначим:

$$\dot{x}_0^1 = B^* = f_0(x_1^1, \dots, x_n^1, \bar{u}, \bar{P}_2); \quad (23)$$

$$x_0^1(t_0) = 0, \quad x_0^1(T) = I^*.$$

Так как задача неавтономна, то введя дополнительную фазовую переменную

$$x_{2n+1}^1 = t, \quad \dot{x}_{2n+1}^1 = 1 \quad (24)$$

с начальным условием $x_{2n+1}^1(t_0) = t_0$, задачу можно свести к автономной. Для рассматриваемой задачи гамильтониан будет иметь вид:

$$H = \sum_{k=1}^2 \sum_{s=0}^{2n+1} \psi_s^k f_s^k + \sum_{s=n+1}^{2n} \psi_s^3 f_s^3, \quad (25)$$

где члены ψ_i^A отсутствуют, так как они согласно (16) умножаются на нуль; $\psi_0^2 = \psi_{2n+1}^2 = 0$; ψ_s^k , ψ_s^3 — сопряженные переменные, имеющие смысл множителей Лагранжа, причем для $s = n+1, \dots, 2n$ и $k = 1, 2$; ψ_s^k , ψ_s^3 — штрафные коэффициен-

ты. Системы, сопряженные системам (9), (16)–(18) и уравнениям (23) и (24) с помощью H , могут быть записаны так:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\psi}_0^1 &= -\frac{\partial H}{\partial x_0^1} = 0, \quad \psi_0^1 = \text{const} = -1; \\ \dot{\psi}_i^1 &= -\frac{\partial H}{\partial x_i^1} = \psi_0^1 \left(\mu \frac{\partial F}{\partial x_i^1} + \Omega_{i\tau} \frac{\partial R_{i\tau}}{\partial x_i^1} \right) - \psi_i^2 \frac{\partial f_i^2}{\partial x_i^1} - \gamma_i; \\ \dot{\psi}_i^2 &= -\frac{\partial H}{\partial x_i^2} = - \left(\psi_i^1 \frac{\partial f_i^1}{\partial x_i^2} + \psi_i^2 \frac{\partial f_i^2}{\partial x_i^2} \right); \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

$$\dot{\psi}_{n+i}^k = -\frac{\partial H}{\partial x_{n+i}^k} = 0, \quad \psi_{n+i}^k = \text{const}, \quad k = 1, 2; \quad (27)$$

$$\dot{\psi}_{n+i}^3 = -\frac{\partial H}{\partial x_{n+i}^3} = 0, \quad \psi_{n+i}^3 = \text{const}; \quad (28)$$

$$\dot{\psi}_i^A = -\frac{\partial H}{\partial x_i^A} = \psi_{n+i}^3 \left[\sum_{d=3}^4 (-1)^d E_{di} D(E_{di}) \right]; \quad (29)$$

$$\dot{\psi}_{2n+1}^1 = -\frac{\partial H}{\partial x_{2n+1}^1} = \psi_0^1 \mu \frac{\partial F}{\partial t}, \quad (30)$$

где

$$\frac{\partial F}{\partial x_i^1} = - \left(1 - \frac{\partial \pi}{\partial P_{i\tau}} \right) \left(g u_i + \frac{\partial \Delta P_i}{\partial x_i^1} \right);$$

$$\frac{\partial R_{i\tau}}{\partial x_i^1} = \frac{\partial u_{i\tau}^*}{\partial x_i^1} (u_i - u_i^0);$$

$$\gamma_i = \begin{cases} \sum_{k=1}^2 (-1)^k \psi_{n+i}^k E_{ki} D(E_{ki}), & \text{когда действуют (11) и (12);} \\ \psi_{n+i}^3 \sum_{d=3}^4 (-1)^d E_{di} D(E_{di}), & \text{когда действуют (14) и (15);} \end{cases}$$

$P_{i\tau}$ — мощность i -й ГЭС; $P_{i\tau} = g u_i (h - x_i^1) - \Delta P_i(x_i^1, u_i)$.

Так как задача решается со свободными правыми концами, то, как известно [Л. 8],

$$\dot{\psi}_i^k(T) = 0, \quad i = 1, \dots, n; \quad k = 1, 2. \quad (31)$$

Естественно, задачу можно считать решенной, если условия (19) и (20) с заданной точностью обращаются в нуль. Следовательно, $\dot{\psi}_{n+i}^k = \text{const}$, $\dot{\psi}_{n+i}^3 = \text{const}$ [условия (27), (28)] должны быть определены из $x_{n+i}^k(T) \rightarrow 0$ и $x_{n+i}^3(T) \rightarrow 0$.

Учитывая, что параметрическая задача, к которой была сведена рассматриваемая задача, эквивалентна задаче с подвижными концами, можно написать [Л. 5]:

$$\dot{\psi}_i^A(t_0) = \dot{\psi}_i^A(T) = 0. \quad (32)$$

Тогда из (29) получим:

$$\int_{t_0}^T \dot{\psi}_{n+i}^3 \left[\sum_{d=3}^4 (-1)^d E_{di} D(E_{di}) \right] dt = 0$$

или с учетом

$$\dot{\psi}_{n+i}^3 = \text{const}, \quad \int_{t_0}^T \left[\sum_{d=3}^4 (-1)^d E_{di} D(E_{di}) \right] dt = 0,$$

из которого после преобразований имеем:

$$x_i^A = \bar{x}_i^1 + \frac{A_i}{2},$$

где

$$\bar{x}_i^1 = \frac{1}{T} \int_{t_0}^T x_i^1 dt, \quad (33)$$

Поскольку основная система уравнений решается без $\dot{\psi}_{2n+1}^1$ и в его определении в рассматриваемой задаче нет необходимо-

сти, то уравнения (24) и (30) из дальнейшего рассмотрения исключаются.

Из условия минимума (25) имеем:

$$\frac{\partial H}{\partial P_{i\tau}} = \psi_0^1 \left(\frac{\partial B}{\partial P_{i\tau}} - \mu \frac{\partial F}{\partial P_{i\tau}} - \Omega_{i\tau} \frac{\partial R_{i\tau}}{\partial P_{i\tau}} \right) = 0; \quad (34)$$

$$\frac{\partial H}{\partial \alpha_{i\tau}} = 2\psi_0^1 \Omega_{i\tau} \alpha_{i\tau} = 0, \quad \Omega_{i\tau} \alpha_{i\tau} = 0; \quad (35)$$

$$\frac{\partial H}{\partial u_i} = \psi_0^1 \left(-\mu \frac{\partial F}{\partial u_i} + \gamma_i - \Omega_{i\tau} \frac{\partial R_{i\tau}}{\partial u_i} \right) + \psi_i^2 d_{i4} = 0; \quad (36)$$

$$\frac{\partial H}{\partial \alpha_{i\tau}} = 2\psi_0^1 \Omega_{i\tau} \alpha_{i\tau} = 0, \quad \Omega_{i\tau} \alpha_{i\tau} = 0, \quad (37)$$

где

$$\frac{\partial F}{\partial P_{i\tau}} = \left(1 - \frac{\partial \pi}{\partial P_{i\tau}} \right), \quad \frac{\partial R_{i\tau}}{\partial P_{i\tau}} = (P_{i\tau}^* + P_{i\tau}^0 - 2P_{i\tau});$$

$$\frac{\partial F}{\partial u_i} = \left(1 - \frac{\partial \pi}{\partial P_{i\tau}} \right) \left[g(h - x_i^1) - \frac{\partial \Delta P_i}{\partial u_i} \right];$$

$$\frac{\partial R_{i\tau}}{\partial u_i} = (u_{i\tau}^* + u_i^0 - 2u_i).$$

Из (35) и (37) следует:

$$\Omega_{i\tau} = 0, \quad \alpha_{i\tau} \neq 0, \quad \text{тогда } P_{i\tau}^0 < P_{i\tau} < P_{i\tau}^*; \quad (38)$$

$$\left. \begin{aligned} \Omega_{i\tau} \neq 0, \quad \alpha_{i\tau} = 0; \\ \Omega_{i\tau} = 0, \quad \alpha_{i\tau} = 0, \end{aligned} \right\}, \quad \text{тогда } P_{i\tau} = P_{i\tau}^* \text{ или } P_{i\tau} = P_{i\tau}^0;$$

$$\Omega_{i\tau} = 0, \quad \alpha_{i\tau} \neq 0, \quad \text{тогда } u_i^0 < u_i < u_{i\tau}^*; \quad (39)$$

$$\left. \begin{aligned} \Omega_{i\tau} \neq 0, \quad \alpha_{i\tau} = 0; \\ \Omega_{i\tau} = 0, \quad \alpha_{i\tau} = 0; \end{aligned} \right\}, \quad \text{тогда } u_i = u_{i\tau}^* \text{ или } u_i = u_i^0.$$

В результате всего изложенного имеем:

1. Систему из $8n$ дифференциальных (9), (17), (26), (27) и $3m+4n+1$ нелинейных алгебраических уравнений (2), (3), (21), (22), (34)–(37), которая должна быть решена относительно $8n$ -мерной вектор-функции

$$\bar{x}_n = (x_1^1, \dots, x_n^1, x_1^2, \dots, x_n^2,$$

$$x_{n+1}^1, \dots, x_{2n}^1, x_{n+1}^2, \dots, x_{2n}^2, \psi_1^1, \dots, \psi_n^1, \psi_1^2, \dots, \psi_n^2;$$

$$\psi_{n+1}^1, \dots, \psi_{2n}^1, \psi_{n+1}^2, \dots, \psi_{2n}^2), P_{i\tau}(t), \Omega_{i\tau}, \alpha_{i\tau}, u_i(t);$$

$\Omega_{i\tau}$, $\alpha_{i\tau}$, γ_i и μ при $4n$ граничных условий на левом конце (8), (19) и $4n$ — на правом конце (19), (31), когда действуют ограничения (11) и (12).

2. Систему из $6n$ дифференциальных (9), (18), (26), (28) и $3m+4n+1$ нелинейных алгебраических уравнений, которая должна быть решена относительно $6n$ -мерной вектор-функции

$$x_6 = (x_1^1, \dots, x_n^1, x_1^2, \dots, x_n^2, x_{n+1}^3, \dots, x_{2n}^3, \psi_1^1, \dots, \psi_n^1;$$

$$\psi_1^2, \dots, \psi_n^2, \psi_{n+1}^3, \dots, \psi_{2n}^3), P_{i\tau}(t), \Omega_{i\tau}, \alpha_{i\tau}, u_i(t), \Omega_{i\tau};$$

$\alpha_{i\tau}$, γ_i , x_i^A и μ при $3n$ граничных условий на левом конце (8), (20), $3n$ — на правом конце (20), (31) и n условий (33), когда действуют ограничения (14) и (15).

Как известно, при численной реализации задач оптимизации динамических систем возникают серьезные трудности, связанные с выбором начальных значений сопряженных переменных гамильтоновой системы, т. е. с выбором $\dot{\psi}_i^k(t_0)$. Положение еще более осложняется при решении задач со многими фазовыми ограничениями, к классу которых относится рассматриваемая здесь задача.

Численный алгоритм. Вводится функция

$$L = \sum_{k=1}^2 \sum_{s=1}^n [\dot{\psi}_s^k(T)]^2 + \sum_{i=1}^n G_i^2 + \xi \sum_{i=1}^n (\Delta V_i)^2, \quad (40)$$

которая должна быть минимизирована по $\dot{\psi}_i^1(t_0)$, $\dot{\psi}_i^2(t_0)$, $\dot{\psi}_i^3(t_0)$, γ_i :

$$G_i = \begin{cases} [x_{n+1}^1(T), x_{n+i}^2(T)] & \text{при (11), (12);} \\ x_{n+i}^3(T) & \text{при (14), (15);} \end{cases}$$

$$\varphi_i^0 = \begin{cases} [\psi_{n+i}^1(t_0), [\psi_{n+i}^2(t_0)] \text{ при } (11), (12);] \\ \psi_{n+i}^3(t_0) \end{cases} \quad \text{при } (14), (15);$$

$$\Delta V_i = \Delta t \sum_{\tau=1}^{24} u_{i\tau} - V_i, \quad \Delta t = 1 \text{ ч}; \quad \xi - \text{масштабный коэффициент.}$$

Процесс минимизации L организуется методом сопряженных градиентов, при котором, как известно, итерационная процедура строится по рекуррентному соотношению

$$\beta^{v+1} = \beta^v - \nabla^v \Delta, \quad (41)$$

где

$$\nabla^v = \left(\frac{\partial L}{\partial \beta} \right)_v + \theta_v \nabla^{v-1}; \quad \theta_v = \left(\frac{\partial L}{\partial \beta} \right)_v / \left(\frac{\partial L}{\partial \beta} \right)_{v-1};$$

$$\theta_0 = 0; \quad \beta_i = [\psi_i^1(t_0), \psi_i^2(t_0), \psi_i^0, \gamma_i];$$

v — номер итерации; Δ — градиентный шаг;

$$\frac{\partial L}{\partial \beta} =$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{\partial \psi^1(T)}{\partial \psi^1(t_0)} & \frac{\partial \psi^2(T)}{\partial \psi^1(t_0)} & \frac{\partial G}{\partial \psi^1(t_0)} & \frac{\partial \Delta V}{\partial \psi^1(t_0)} \\ \frac{\partial \psi^1(T)}{\partial \psi^2(t_0)} & \frac{\partial \psi^2(T)}{\partial \psi^2(t_0)} & \frac{\partial G}{\partial \psi^2(t_0)} & \frac{\partial \Delta V}{\partial \psi^2(t_0)} \\ \frac{\partial \psi^1(T)}{\partial \psi^0} & \frac{\partial \psi^2(T)}{\partial \psi^0} & \frac{\partial G}{\partial \psi^0} & \frac{\partial \Delta V}{\partial \psi^0} \\ \frac{\partial \psi^1(T)}{\partial \gamma} & \frac{\partial \psi^2(T)}{\partial \gamma} & \frac{\partial G}{\partial \gamma} & \frac{\partial \Delta V}{\partial \gamma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi^1(T) \\ \psi^2(T) \\ G \\ \xi \Delta V \end{bmatrix} = MN.$$

При разработке численного алгоритма оптимального управления режимами электроэнергетических систем предполагается, что алгоритмы и программы расчета стационарных режимов и производных от потерь активной мощности в электрических сетях имеются. Такое предположение вполне реально, так как эти задачи в настоящее время разработаны весьма подробно [Л. 9 и 10].

Вычислительная процедура решения рассматриваемой задачи строится в следующей последовательности.

1. Период управления $T - t_0$ делится на равные интервалы $\Delta t = t_\tau - t_{\tau-1} = 1 \text{ ч}$, тогда число расчетных интервалов $\sigma = 24$, $t_0 = t_0 = 0$, $t_{24} = T = 24$.

2. Произвольно задаются $\psi_i^k(0)$, $\psi_{n+i}^k(0)$, $\psi_{n+i}^3(0)$, γ_i и x_i^A , ($i = 1, \dots, n$; $k = 1, 2$). На сходимость итерационного процесса существенно влияют численные значения этих параметров, поэтому, хотя и они в алгоритме задаются произвольно, при их выборе необходимо в каждом конкретном случае соответствующим образом использовать накопленный опыт расчетов.

3. Для первого интервала ($\tau=1$) с учетом условий (4) произвольно задаются $P_{j\tau}$ и u_i для всех станций, кроме балансирующей. Причем, если балансирующей является ГЭС, то $j=1, \dots, m$, $i=1, \dots, b-1, b+1, \dots, n$, если же за балансирующую принять ТЭС, тогда $i=1, \dots, n$; $j=1, \dots, b-1, b+1, \dots, m$, где b — номер балансирующей станции (за балансирующую целесообразно принять крупную станцию). Предположим, что такой станцией оказалась ТЭС, тогда соответственно произвольно заданным u_i вычисляется $P_{i\tau}$, принимая в выражении для

$$P_{i\tau} x_i^1 = x_i^1(0) = c_i^1.$$

Затем по программе стационарных режимов и производных от потерь активной мощности в сетях вычисляется мощность балансирующей станции

$$P_{6,\tau}, \quad \frac{\partial \pi}{\partial P_{j\tau}} \text{ и } \frac{\partial \pi}{\partial P_{i\tau}} \quad \left(j \neq 6, \quad \frac{\partial \pi}{\partial P_{6,\tau}} = 0 \right).$$

4. Проверяется условие (4). Если оно выполняется, тогда согласно полученному $P_{6,\tau}$ из соответствующего уравнения системы (34) однозначно определяется μ . Если же не выполнено условие (4), тогда $\mu = \frac{\partial B}{\partial P_{6,\tau}}$ либо при $P_{6,\tau} = P_{6,\tau}^*$, либо

при $P_{6,\tau} = P_{6,\tau}^{01}$ в зависимости от того, с какой стороны нарушено неравенство (4).

5. Полученное μ вместе с вычисленными $\frac{\partial \pi}{\partial P_{j\tau}}$ и $\frac{\partial \pi}{\partial P_{i\tau}}$ подставляется в (34) и (36), и по методу Ньютона, т. е. по рекуррентным соотношениям

$$P_{j\tau}^{r+1} = P_{j\tau}^r - \delta \frac{\partial H}{\partial P_{j\tau}} \bigg/ \frac{\partial^2 H}{\partial P_{j\tau}^2}, \quad j = 1, \dots, m, \quad j \neq 6; \quad (42)$$

$$u_i^{r+1} = u_i^r - \delta \frac{\partial H}{\partial u_i} \bigg/ \frac{\partial^2 H}{\partial u_i^2}, \quad i = 1, \dots, n \quad (43)$$

определяются корни этих уравнений, где $0 < \delta \leq 1$. В (42) и (43) принимается $\delta=1$ до появления признаков заклинивания итерационного процесса, после чего δ уменьшается.

6. Проверяются условия (4). В случае нарушения этих условий в соответствующих уравнениях системы (34) и (36) подставляются предельные значения $P_{j\tau}$ или u_i и решаются относительно $\Omega_{j\tau}$ или $\Omega_{i\tau}$. При этом, если $\Omega_{j\tau} > 0$ или $\Omega_{i\tau} > 0$, тогда принимается

$$P_{j\tau} = P_{j\tau}^*, \quad (P_{j\tau} = P_{j\tau}^0) \text{ или } u_i = u_i^*, \quad (u_i = u_i^0)$$

и осуществляется переход к п. 7. Если же $\Omega_{j\tau} < 0$ или $\Omega_{i\tau} < 0$, то в (34) или (36) принимается $\Omega_{j\tau} = 0$ или $\Omega_{i\tau} = 0$, а также в правой части (42) или (43) $P_{j\tau} = P_{j\tau}^*$, ($P_{j\tau} = P_{j\tau}^0$) или $u_i = u_i^*$, ($u_i = u_i^0$) и строится новая итерационная процедура до тех пор, пока $\partial H / \partial P_{j\tau}$ и $\partial H / \partial u_i$ с заданной точностью не будут равны нулю.

7. Полученные в п. 6 u_i , ($i=1, \dots, n$) подставляются в систему дифференциальных уравнений (9) и (26) и решаются относительно x_i^k , ψ_i^k . Далее определяются:

$$x_{i0}^1 = \frac{1}{2} [x_i^1(t_0) + x_i^1(t_1)];$$

$$\psi_{i0}^2 = \frac{1}{2} [\psi_i^2(t_0) + \psi_i^2(t_1)].$$

8. Вычисленные x_{i0}^1 и ψ_{i0}^2 подставляются в уравнения (36) и заново решаются относительно u_i согласно изложенной в п. 5 и 6 численной процедуре.

9. Вычислительный процесс, описанный в п. 5—8, повторяется, пока u_i в двух последних итерациях не совпадут. По полученным u_i и соответственно ему x_{i0}^1 определяются $P_{i\tau}$.

10. По данным $P_{j\tau}$, $P_{i\tau}$ согласно п. 3 вычисляются новые значения $P_{6,\tau}$, $\partial \pi / \partial P_{j\tau}$, $\partial \pi / \partial P_{i\tau}$ и проверяется условие (4) для балансирующей станции. Если оно выполняется, тогда процесс, описанный в п. 4—9, повторяется до $|\mu^{e+1} - \mu^e| \leq \varepsilon_1$, где e — номер итерации по μ ; ε_1 — достаточно малое число. Если же условие (4) нарушается, т. е. $P_{6,\tau} > P_{6,\tau}^*$ или $P_{6,\tau} < P_{6,\tau}^0$, тогда итерационная процедура с п. 4 до 9 строится при

$$\mu^{e+1} = \begin{cases} \mu^*, & \text{если } \mu^e < \mu^* \text{ и } P_{6,\tau}^{e+1} > P_{6,\tau}^*; \\ \mu^0, & \text{если } \mu^e > \mu^0 \text{ и } P_{6,\tau}^{e+1} < P_{6,\tau}^0; \\ \mu^* - \delta \Delta P_{6,\tau}^* / \frac{\partial \Delta P_{6,\tau}^*}{\partial \mu}, & \text{если } \mu^e = \mu^*; \\ \mu^0 - \delta \Delta P_{6,\tau}^0 / \frac{\partial \Delta P_{6,\tau}^0}{\partial \mu}, & \text{если } \mu^e = \mu^0, \end{cases} \quad (44)$$

где $\mu^0 = \left(\frac{\partial B}{\partial P_{6,\tau}} \right)^0$, $\mu^* = \left(\frac{\partial B}{\partial P_{6,\tau}} \right)^*$ — соответственно минимальное и максимальное значение относительных приростов балансирующей станции; $\Delta P_{6,\tau}^* = P_{6,\tau}^{e+1} - P_{6,\tau}^*$, $\Delta P_{6,\tau}^0 = P_{6,\tau}^{e+1} - P_{6,\tau}^0$. Из (44) нетрудно заметить, что в итерационном процессе может оказаться $\mu > \mu^*$ или $\mu < \mu^0$. Это говорит о том, что в уравнении (34), записанном для балансирующей станции, $\Omega_{6,\tau} \neq 0$, следовательно, $\mu \neq \partial B / \partial P_{6,\tau}$, $\frac{\partial B}{\partial P_{6,\tau}} = \left(\frac{\partial B}{\partial P_{6,\tau}} \right)^*$ или $\frac{\partial B}{\partial P_{6,\tau}} = \left(\frac{\partial B}{\partial P_{6,\tau}} \right)^0$.

11. При выполнении $|\mu^{e+1} - \mu^e| \leq \varepsilon_1$ для $\tau=1$ осуществляется переход к $\tau=2, \dots, 24$ с выполнением численных операций, изложенных в п. 3—10. При этом для системы (9) и (26) за начальные значения при $\tau=2$ принимаются

$$x_i^1(l_1), x_i^2(l_1), \psi_i^1(l_1), \psi_i^2(l_1) \text{ и т. д.}$$

12. По выражениям (33) и (41) вычисляются новые x^A и β и весь процесс с п. 2—11 повторяется до $L \leq \varepsilon_2$, где ε_2 — заранее заданное малое число. При этом элементы матрицы M определяются численным дифференцированием, поскольку аналитически их определять не представляется возможным.

Нетрудно заметить, что при вычислении β^{v+1} используется значение x^A , полученное на v -й итерации. Такое решение продиктовано характером задачи и вполне допустимо, так как x^A по итерациям стремится к стабилизации и в решениях, близких к сходящемуся, изменение x^A практически равно нулю.

Аналогичная картина имеет место и при организации поиска по μ , в особенности когда μ определяется из (44), а в выражениях (42) и (43) подставляются $\frac{\partial \pi}{\partial P_{j\tau}}$, $\frac{\partial \pi}{\partial P_{i\tau}}$, полученные при

$P_{6,\tau} > P_{6,\tau}^*$ или $P_{6,\tau} < P_{6,\tau}^0$. Это несоответствие также ликвидируется для решений, близких к $|\mu^{e+1} - \mu^e| \leq \varepsilon_1$.

На основе изложенного была разработана программа для ЦВМ «Урал-14Д» и испытана на примере одной конкретной энергосистемы, состоящей из одной крупной ГЭС и пяти тепловых станций.

Предварительными исследованиями было установлено, что для данной энергосистемы $\frac{\partial \pi}{\partial P_{j\tau}}$ и $\frac{\partial \pi}{\partial P_{i\tau}}$ близки к нулю, поэтому программа была реализована при $\frac{\partial \pi}{\partial P_{j\tau}} = \frac{\partial \pi}{\partial P_{i\tau}} = 0$, $j = 1, \dots, 5$.

Вычислительная процедура, изложенная в п. 3—10, в зависимости от τ потребовала 3—5 сек. В ходе итерационного процесса решения рекуррентных уравнений (42) и (43), как правило, ограничения на управляющие параметры нарушались, часто наблюдалось заикливание, которое исключалось путем ступенчатого уменьшения δ на величину $\Delta\delta = 0,1$. Сходимость по μ в зависимости от τ обеспечивалась в среднем после шести итераций. При выполнении конкретных практических расчетов ограничения на уровень нижнего бьефа не нарушались и сходимость процесса по β обеспечивалась после 4—6 итераций с машинным временем, равным 12—15 мин. Для полного испытания алгоритма и программы область допустимого изменения фазовых координат была сужена, что привело к нарушениям ограничений на уровень нижнего бьефа по абсолютной величине. В этом случае для достижения сходящегося решения по β потребовалось 8—12 итераций с машинным временем 1—1,3 ч. Исследования показали, что на сходимость итерационного процесса по β существенно влияют степень нарушения ограничений на фазовые координаты и величины ε_2 и β . Следовательно, для сокращения необходимого машинного времени в каждом конкретном случае ε_2 и β должны быть выбраны рационально, используя при этом накопленный опыт расчетов.

Выводы. 1. Предложенный метод решения задачи оптимизации суточных режимов электроэнергетических систем с учетом нестационарных процессов, ограничений на уровень нижнего бьефа как по абсолютной величине, так и по амплитуде колебания является наиболее общим.

2. Когда учет нестационарных процессов экономического эффекта не дает, но учет ограничений на уровень нижнего бьефа обязателен, тогда численная процедура упрощается за счет уменьшения размерности β , именно принимается

$$\psi_i^k = \text{const}, \quad \beta_i = (\psi_i^0, \gamma_i)$$

и как следствие матрица M и вектор N преобразуются и принимают вид:

$$M = \begin{bmatrix} \frac{\partial G}{\partial \psi^0} & \frac{\partial \Delta V}{\partial \psi^0} \\ \frac{\partial G}{\partial \gamma} & \frac{\partial \Delta V}{\partial \gamma} \end{bmatrix}, \quad N = \begin{bmatrix} G \\ \xi \Delta V \end{bmatrix}.$$

3. Из изложенного метода можно получить и частное решение, соответствующее случаям $\frac{\partial \pi}{\partial P_{j\tau}} = \frac{\partial \pi}{\partial P_{i\tau}} = 0$, $h_i - x_i^1 =$

$$= \text{const}, \text{ для которых } \beta_i = \gamma_i, \quad M = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta V}{\partial \gamma} \end{bmatrix}, \quad N = [\xi \Delta V].$$

4. Для обоснования того или иного допустимого упрощения задачи необходимо иметь общий и точный метод решения задачи, так как экспериментирование оптимальных процессов исключается. В качестве такого метода рекомендуется предложенный в работе метод.

Приложение. Если ограничения типа (4) учесть по методу Куна — Таккера, то необходимо ввести условия [Л. 11]:

$$r_{j\tau}^* = P_{j\tau} - P_{j\tau}^* \leq 0, \quad \lambda_{j\tau}^* \geq 0; \quad (45)$$

$$r_{j\tau}^0 = P_{j\tau}^0 - P_{j\tau} \leq 0, \quad \lambda_{j\tau}^0 \geq 0; \quad (46)$$

$$r_{i\tau}^* = u_i - u_i^* \leq 0, \quad \lambda_{i\tau}^* \geq 0; \quad (47)$$

$$r_{i\tau}^0 = u_i^0 - u_i \leq 0, \quad \lambda_{i\tau}^0 \geq 0; \quad (48)$$

$$\sum_{j=1}^m \bar{r}_{j\tau} \bar{\lambda}_{j\tau} + \sum_{i=1}^n \bar{r}_{i\tau} \bar{\lambda}_{i\tau} = 0, \quad (49)$$

где

$$\bar{r}_{j\tau} = (r_{j\tau}^*, r_{j\tau}^0); \quad \bar{r}_{i\tau} = (r_{i\tau}^*, r_{i\tau}^0);$$

$$\bar{\lambda}_{j\tau} = (\lambda_{j\tau}^*, \lambda_{j\tau}^0); \quad \bar{\lambda}_{i\tau} = (\lambda_{i\tau}^*, \lambda_{i\tau}^0);$$

λ^*, λ^0 — множители Лагранжа. Тогда

$$B^* = B - \mu F + \sum_{j=1}^m \bar{r}_{j\tau} \bar{\lambda}_{j\tau} + \sum_{i=1}^n \bar{r}_{i\tau} \bar{\lambda}_{i\tau} + \sum_{i=1}^n \gamma_i u_i,$$

$$\frac{\partial H}{\partial P_{j\tau}} = \psi_0 \left(\frac{\partial B}{\partial P_{j\tau}} - \mu \frac{\partial F}{\partial P_{j\tau}} + \bar{\lambda}_{j\tau} \frac{\partial \bar{r}_{j\tau}}{\partial P_{j\tau}} \right) = 0; \quad (50)$$

$$\frac{\partial H}{\partial u_i} = \psi_0 \left(-\mu \frac{\partial F}{\partial u_i} + \gamma_i + \bar{\lambda}_{i\tau} \frac{\partial \bar{r}_{i\tau}}{\partial u_i} \right) + \psi_i^0 d_{i4} = 0. \quad (51)$$

Из (45) — (49) вытекает:

$$\lambda_{j\tau}^* = 0, \quad r_{j\tau} < 0, \quad \text{тогда } P_{j\tau} < P_{j\tau}^*;$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{j\tau}^* > 0, \quad r_{j\tau}^* = 0; \\ \lambda_{j\tau}^* = 0, \quad r_{j\tau}^* = 0, \end{aligned} \right\} \text{ тогда } P_{j\tau} = P_{j\tau}^*; \quad (52)$$

$$\lambda_{j\tau}^0 = 0, \quad r_{j\tau}^0 < 0, \quad \text{тогда } P_{j\tau}^0 < P_{j\tau};$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{j\tau}^0 > 0, \quad r_{j\tau}^0 = 0; \\ \lambda_{j\tau}^0 = 0, \quad r_{j\tau}^0 > 0, \end{aligned} \right\} \text{ тогда } P_{j\tau} = P_{j\tau}^0; \quad (53)$$

$$\lambda_{i\tau}^* = 0, \quad r_{i\tau}^* < 0, \quad \text{тогда } u_i < u_i^*;$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{i\tau}^* > 0, \quad r_{i\tau}^* = 0; \\ \lambda_{i\tau}^* = 0, \quad r_{i\tau}^* = 0, \end{aligned} \right\} \text{ тогда } u_i = u_i^*; \quad (54)$$

$$\lambda_{i\tau}^0 = 0, \quad r_{i\tau}^0 < 0, \quad \text{тогда } u_i^0 < u_i;$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{i\tau}^0 > 0, \quad r_{i\tau}^0 = 0; \\ \lambda_{i\tau}^0 = 0, \quad r_{i\tau}^0 = 0, \end{aligned} \right\} \text{ тогда } u_i = u_i^0. \quad (55)$$

В силу (49) случаи $r_{j\tau}^* < 0$, $\lambda_{j\tau}^* > 0$, $r_{j\tau}^0 < 0$, $\lambda_{j\tau}^0 > 0$, $r_{i\tau}^* < 0$, $\lambda_{i\tau}^* > 0$, $r_{i\tau}^0 < 0$ и $\lambda_{i\tau}^0 > 0$ исключаются. Сравнивая условия (38) и (39) с (52) — (55), нетрудно заметить их полное сходство с единственной лишь разницей в численных значениях множителей Лагранжа. В самом деле

$$-\mathcal{Q}_{j\tau} \frac{\partial R_{j\tau}}{\partial P_{j\tau}} = \begin{cases} \mathcal{Q}_{j\tau}^* (P_{j\tau}^* - P_{j\tau}^0), & \text{когда } P_{j\tau} = P_{j\tau}^*; \\ \mathcal{Q}_{j\tau}^0 (P_{j\tau}^0 - P_{j\tau}^*), & \text{когда } P_{j\tau} = P_{j\tau}^0; \end{cases}$$

$$\bar{\lambda}_{j\tau} \frac{\partial \bar{r}_{j\tau}}{\partial P_{j\tau}} = \begin{cases} \lambda_{j\tau}^*, & \text{когда } P_{j\tau} = P_{j\tau}^*; \\ -\lambda_{j\tau}^0, & \text{когда } P_{j\tau} = P_{j\tau}^0. \end{cases}$$

Из (34) и (50) получим: $-\mathcal{Q}_{j\tau} \frac{\partial R_{j\tau}}{\partial P_{j\tau}} = \bar{\lambda}_{j\tau} \frac{\partial \bar{r}_{j\tau}}{\partial P_{j\tau}}$, $\mathcal{Q}_{j\tau}^* (P_{j\tau}^* - P_{j\tau}^0) = \lambda_{j\tau}^*$, $\mathcal{Q}_{j\tau}^0 (P_{j\tau}^0 - P_{j\tau}^*) = -\lambda_{j\tau}^0$. Следовательно, множители $\mathcal{Q}_{j\tau}$ и $\lambda_{j\tau}$ совпадают с точностью до постоянного множителя $P_{j\tau}^* - P_{j\tau}^0$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Картвелишвили Н. А. Влияние колебаний уровня нижнего бьефа ГЭС на оптимальный режим энергетической системы. — *Изв. АН СССР. Энергетика и автоматика*, 1961, № 5.
2. Горюштин В. М. Наивыгоднейшие режимы работы гидростанций в энергетических системах. М., Госэнергоиздат, 1959.
3. Горюштин В. М., Цветков Е. В. Работы ВНИИЭ — ВЦГТУ по разработке серии программ для расчета оптимальных режимов энергосистем на ЦВМ М-220 (БЭСМ-4). — В сб. *Материалы НТОЭП и ОДУ Урала «Применение ЭЦВМ и аналоговых устройств для решения энергетических задач»*. М., «Энергия», 1969.
4. Шахвердян С. В. Оптимальное управление режимами электроэнергетических систем с помощью функции Ляпунова — Веллмана. — *Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт*, 1971, № 3.
5. Понрягин Л. С. и др. Математическая теория оптимальных процессов. М., «Наука», 1969.

6. Чэнг С. С. Л. Видоизмененный принцип максимума для оптимальных систем с ограниченными фазовыми координатами. — В сб.: *Труды II Международного конгресса ИФАК. Оптимальные системы. Статистические методы*. М., «Наука», 1965.
7. Фиано А., Мак-Кормик Г. Нелинейное программирование. Методы последовательной безусловной минимизации. М., «Мир», 1972.
8. Метод оптимизации с приложением к механике космического полета. Под ред. Дж. Лейтмана. М., «Наука», 1965.
9. Крумм Л. А. Применение метода Ньютона — Рафсона для расчета стационарного режима сложных электрических систем. — *Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт*, 1965, № 5.
10. Лазебник А. И. Аналитический метод расчета производных от потерь мощности в электрической сети. Применение математических методов и вычислительных машин в энергетике. Вып. 2. Электрические сети и системы. Кишинев, Изд. АН МССР, 1968.
11. Ермолев Ю. М. Методы решения нелинейных экстремальных задач. Кибернетика. Изд. АН УССР, 1966, № 4.

[12.3.1974]



УДК 621.3.016.3.001.5

Состав узлов нагрузок по видам токоприемников и его определение

Канд. техн. наук КИТУШИН В. Г., инж. ХОМЛЯНСКАЯ Л. Д.

Новосибирск

При эксплуатации и проектировании энергосистем возникает ряд задач, решение которых не может быть выполнено без знания характеристик электрических нагрузок узлов системы. Практикуемое часто априорное задание нагрузок в виде постоянных сопротивлений, мощностей или представление различным сочетанием их характеристик по типам приводов (синхронные двигатели, асинхронные и т. д.) приводит в решении отдельных задач к недопустимым погрешностям. Так, при исследованиях статической устойчивости, связанных с определением предела передаваемой мощности по транзитным линиям, питающим крупные нагрузочные узлы, разное представление нагрузки дает погрешность в определении предела до 50% [Л. 1]. Необходимость максимально точно учитывать характеристики нагрузки возникает при расчетах статической устойчивости особенно в тех случаях, когда суммарная мощность промежуточных нагрузок составляет от мощности станций, перераспределяющих мощность в передающую систему, более 10% [Л. 2]. Анализ устойчивости самой нагрузки естественно предполагает знание состава и характеристик нагрузок. Расчеты динамической устойчивости требуют в общем случае учитывать состав нагрузки, т. е. поэлементное отображение всех основных типов потребителей. Проведенные исследования показывают, что разница между пределами динамической устойчивости системы при разных составах нагрузки может составлять 25—35%. Еще более сложная ситуация при определении допустимости асинхронного хода, уставок АЧР и т. д.

Наиболее достоверную информацию можно было бы получить непосредственным исследованием действующих систем. Однако, оставляя в стороне практические трудности реализации этой возможности периодически и в массовом масштабе, можно сказать, что это решило бы задачу только для условий эксплуатации. Для задач проектирования (обычно с перспективой в 5—10 лет), когда нагрузки в системе практически удваиваются, необходимо искать

другой путь. Если обратиться к технологии проектирования схем развития электрических систем на перспективу и той информации, которая имеется по нагрузкам систем и их узлов, то можно убедиться, что единственной информацией, которую как-то можно использовать для определения характеристик нагрузок, является ее отраслевая структура. Последнее и явилось основанием для разработок способа определения характеристик нагрузок на основе ее отраслевого состава. Процесс реализации этого способа состоит из двух этапов. На первом этапе по информации об отраслевой структуре узла нагрузки определяется состав нагрузки, т. е. процентное соотношение различных токоприемников и их характеристики. На втором этапе на основе полученного состава нагрузки и его эквивалентирования определяются необходимые характеристики нагрузки.

Как показывают исследования, такой подход определения характеристик нагрузки, связанный с получением состава узлов нагрузок, позволяет решать и ряд экономических задач обеспечения качества электроэнергетики.

В работе излагается подход к определению состава нагрузок и приводятся исходные материалы, позволяющие произвести оценку этого состава. На основе отраслевого принципа была разработана статистическая информация по составу для групп предприятий — представителей различных отраслей. Для всех предприятий анализировались схемы электроснабжения, определялись максимальные потребляемые мощности отдельными видами токоприемников: асинхронными и синхронными двигателями различной мощности, статической нагрузкой (печи, выпрямители, нагревательные устройства), освещением. Следует отметить, что состав определялся по фактически потребляемой мощности отдельными видами токоприемников в связи с тем, что исходной информацией является потребляемая мощность нагрузки в узлах. В литературе данные по составу в основном приводятся для установленной мощно-

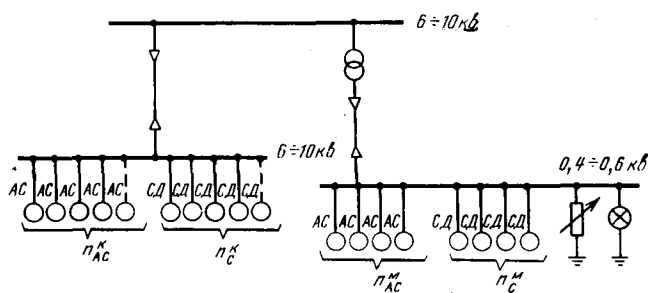


Рис. 1. Обобщенная схема питания потребителей.

сти, что требует дополнительных данных по установленной мощности $P_{уст}$ в узле или коэффициентам спроса k_c .

Анализировалась двигательная нагрузка: единичные мощности двигателей, их количество, коэффициенты нагрузки, удаленность от шин питания, моментно-скоростные характеристики. При обработке информации о составе нагрузки, в частности двигательной нагрузки, из-за большого диапазона и разнообразия двигателей встал вопрос о форме отражения этой информации, поскольку непосредственное представление всего спектра двигателей невозможно. Разбивка всего спектра двигателей на группы и их эквивалентирование, с одной стороны, требует знания правил эквивалентирования, а с другой стороны, различие решаемых задач с исполь-

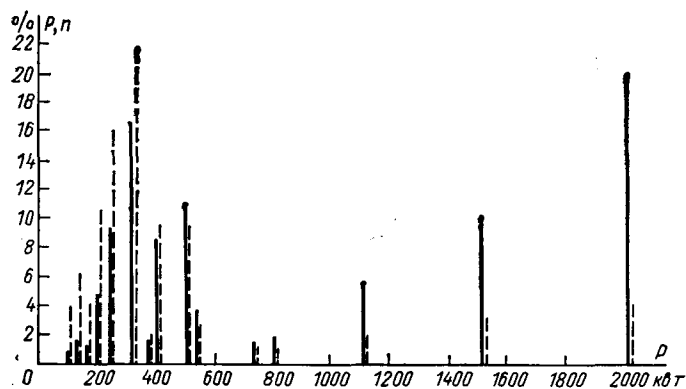


Рис. 2. Распределение потребителей мощности и количества высоковольтных асинхронных двигателей по их единичным мощностям для металлургического завода.

— — — — — распределение потребляемой мощности; — — — — — распределение количества двигателей.

зованием состава нагрузок требует и различных критериев эквивалентирования. Ни те, ни другие вопросы в настоящее время еще достаточно не разработаны. Вместе с тем ясно, что замена группы различных двигателей одним на основе простого осреднения связано с дополнительной погрешностью [Л. 3].

Учитывая изложенное, было решено разбить весь спектр двигателей на высоковольтные и низ-

Отрасль	Крупные (высоковольтные) асинхронные двигатели						Мелкие (низковольтные) асинхронные двигатели						Крупные синхрон	
	β_a^k	\bar{k}_c	\bar{P}_a^k	σ_{P^k}	\bar{k}_z	σ_{kz}	β_a^M	\bar{k}_c	\bar{P}_a^M	σ_{P^M}	\bar{k}_z	σ_{kz}	β_c^k	\bar{k}_c
	диапазон, %		квт	квт			диапазон, %		квт	квт			диапазон, %	
Машиностроение	4 0-14	0,37	900	480	0,66	0,1	44 30-60	0,14	9	16	0,53	0,23	14 0-50	0,4
Черная и цветная металлургия	13 2-20	0,54	500	490	0,65	0,12	33 20-70	0,2	15	14	0,4	0,1	26 20-40	0,57
Алюминиевая и производство ферросплавов	1	0,62			0,68	0	5 2-9	0,56			0,5	0,1	1	0,86
Химия, нефтехимия	16 0-30	0,69	420	140	0,67	0,07	49 13-92	0,62	10	16	0,56	0,1	17 0-50	0,62
Строительные материалы	10 0-54	0,57	310	—	0,8	0,07	59 13-94	0,55	25	62	0,6	0,12	14 0-37	0,88
Нефтедобывающая	69 42-96	0,51	1400	150	0,75	0,1	16 4-37	0,37	57	82	0,5	0,1	10 4-43	0,67
Горнодобывающая	21 0-53	0,61	370	130	0,75	0,09	49 7-70	0,6	15	28	0,75	0,08	21 8-50	0,81
Целлюлозно-бумажная	19 10-32	0,54	1440	380	0,65	0,08	45 30-53	0,44	24	47	0,6	0,08	25 10-34	0,67
Деревообрабатывающая	—	—	—	—	—	—	88 86-91	0,44	9	19	0,6	0,08	—	—
Легкая, пищевая	0 0-6	—	—	—	—	—	68 27-87	0,52	12	21	0,7	0,08	5 9-32	0,93
Строительство	—	—	—	—	—	—	70	—	15	15	—	—	—	—
Комбыт	—	—	—	—	—	—	35	—	1,7	—	—	—	—	—
Сельское хозяйство	—	—	—	—	—	—	60	—	5	—	—	—	—	—
Электрифицированный железнодорожный транспорт	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. Диапазоны реальных спектров двигателей: для мелких (низковольтных) асинхронных от 0,06 до 625 квт; для крупных (высоковольтных) от 200 до 17 500 квт.

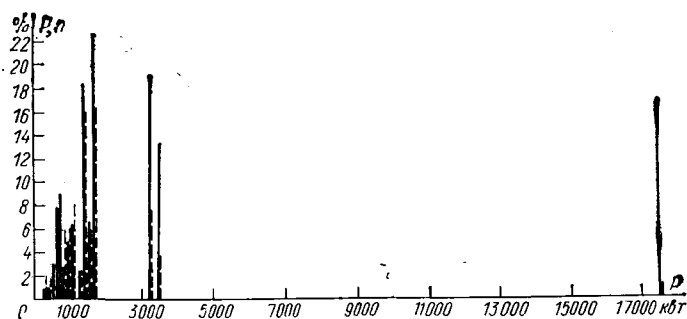


Рис. 3. Распределение потребляемой мощности и количества высоковольтных синхронных двигателей по их единичным мощностям для металлургического завода.

ковольтные (или крупные и мелкие), что обуславливается не только заметным различием их параметров, но и различной удаленностью двигателей от питающих шин, определяемой в основном числом трансформации (рис. 1), и характеризовать весь спектр распределения единичных мощностей двигателей двумя величинами: средней мощностью двигателей \bar{p} и дисперсией D_p или среднеквадратичным отклонением от средней мощности $\sigma_p = \sqrt{D_p}$.

Эти две характеристики практически давали бы исчерпывающую информацию о спектре двигателей, если бы его распределение было близким к нор-

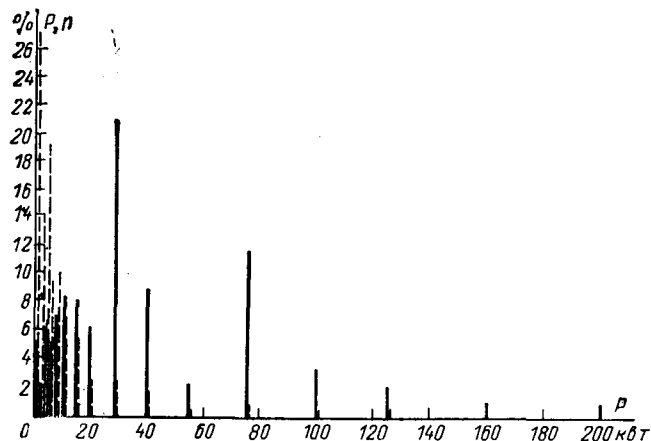


Рис. 4. Распределение потребляемой мощности и количества низковольтных асинхронных двигателей по их единичным мощностям для завода электротермического оборудования.

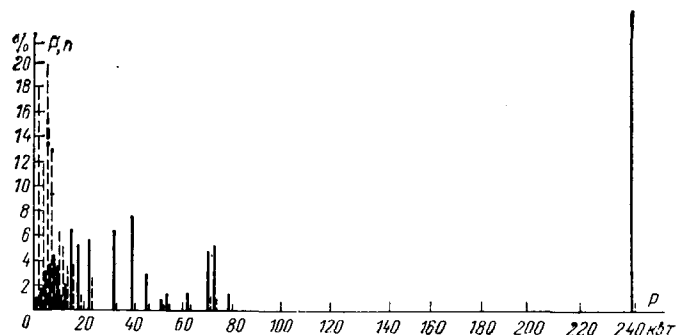


Рис. 5. Распределение потребляемой мощности и количества низковольтных асинхронных двигателей по их единичным мощностям для мебельной фабрики.

(высоковольтные) ые двигатели				Диапазон мощности двигателя нагрузки, %	Статистическая нагрузка		$\cos \varphi_{ср}$ $\cos \varphi_{ср}$	$P_{ср}$ кВт/кВт	α
$\frac{P_{ср}}{P_{квт}}$	σ_p кВт	\bar{k}_3	σ_{k3}		$\frac{P_{ср}}{P_{ср}}$ диапазон, %	в том числе $\frac{P_{ср}}{P_{ср}}$ диапазон, %			
760	310	0,5	0,12	40÷90	38 10÷60	8 3—15	0,92 0,8	0,28	0÷1,5
1400	2300	0,68	0,11	41÷96	28 4÷59	5 3÷6	0,93	0,10	
		0,85	0	3÷11	93 89÷97		0,93 0,9		
450	180	0,7	0,05	72÷92	8 8÷28	6 1÷12	0,94 0,86	0,27	2÷3
1000	600	0,8	0,13	72÷98	17 2÷28		0,94	0,30	
1500	1500	0,8	0,07	72÷97	5 1÷28		0,9 0,6	0,14	
720	320	0,87	0,03	57÷98	9 2÷43		0,94 0,83	0,15	0÷1
1500	400	0,8	0,06	72÷97	11 3÷28		0,94	0,2	
—	—	—	—	86÷91	12 9÷14		0,92 0,74	0,36	
400	110	0,85	0,08	27÷94	27 6÷73		0,94 0,83	0,42	
					30				
					65				
					40				
					100	5			0,5—1

асинхронных от 125 до 5500 кВт; для крупных (высоковольтных) синхронных

мальному. Однако, как показывает анализ, такой закон справедлив не для всех предприятий. В качестве примера на рис. 2—5 приведены распределения количества и потребляемой мощности двигателей по их единичным мощностям для некоторых предприятий.

Но учитывая, что в узле нагрузки будут суммироваться составы различных отраслей и при большем количестве предприятий (практически более 4—6) начинает сказываться предельная теорема Ляпунова о нормальном законе распределения суммы независимо от законов распределения составляющих, признано целесообразным ограничиться для характеристики спектра мощностей двигателей только указанными двумя параметрами \bar{p} , σ .

Анализ двигательной нагрузки показал, что значение минимальных и максимальных мощностей единичных двигателей для различных предприятий различных отраслей практически совпадают (особенно для низковольтных двигателей). Вместе с тем, доля тех или иных двигателей в общем диапазоне у каждой отрасли различна, что хорошо количественно характеризует два параметра \bar{p} и σ . Кроме того, вероятностный характер режима работы отдельных токоприемников дает основание для вероятностной характеристики и такого важного параметра двигателей, как коэффициент загрузки k_3 .

Результаты обработки статистической информации об отраслевом составе нагрузки приведены в таблице, где β_a^k — активная мощность, потребляемая крупными асинхронными двигателями; β_a^m — активная мощность, потребляемая мелкими асинхронными двигателями; β_c^k — активная мощность, потребляемая крупными синхронными двигателями; $\beta_{осв}$ — активная мощность, потребляемая освещением; $\beta_{ст}$ — активная мощность, потребляемая статической нагрузкой (все указанные активные мощности даны в процентах от суммарной потребляемой активной мощности данной отрасли в узле нагрузки); $\beta_{бск}$ — реактивная мощность батарей статических конденсаторов; k_3 — средние коэффициенты загрузки соответствующих групп двигателей; $k_c = \frac{k_3 k_o}{\eta_{дв} \eta_c}$ — коэффициенты спроса соответствующих групп двигателей; k_3 — коэффициенты загрузки соответствующих групп двигателей; k_o — коэффициенты одновременности максимумов нагрузки соответствующих групп двигателей; $\eta_{дв}$ — значения к. п. д. соответствующих групп двигателей; η_c — значение к. п. д. сети; $\alpha = \frac{dM_c}{d\omega}$ — относительная крутизна моментно-скоростной характеристики приводных механизмов при номинальной частоте вращения; $\cos \varphi_{ест}$ — значение естественного косинуса φ без учета компенсирующих устройств; $\cos \varphi_{ср.вз}$ — средневзвешенные значения косинуса φ с учетом компенсирующих устройств на шинах 0,4 и 6–10 кВ.

Располагая подобной статистической информацией, а также исходными данными о потребляемой мощности различными отраслями в узлах нагрузки (P_i , где $i=1, 2, \dots, N$ — количество отраслей), возможно определить состав узла комплексной нагрузки следующим образом. Потребляемые мощности различными группами токоприемников в узле:

$$\begin{aligned} P_a^k &= \sum_{i=1}^N \beta_{ai}^k P_i; & P_a^m &= \sum_{i=1}^N \beta_{ai}^m P_i; \\ P_c^k &= \sum_{i=1}^N \beta_{ci}^k P_i; & P_{ст} &= \sum_{i=1}^N \beta_{сти} P_i; \\ P_{осв} &= \sum_{i=1}^N \beta_{осви} P_i; & Q_{бск} &= \sum_{i=1}^N \beta_{бски} P_i. \end{aligned}$$

Для двигательной нагрузки узла основные характеристики

$$\bar{p} = \frac{\sum_{i=1}^N p_i n_i}{n},$$

где $n_i = \frac{P_{уст}}{\bar{p}_i} = \frac{\beta_i P_i}{k_{ci} \bar{p}_i}$ — количество двигателей определенной группы i -й отрасли в узле, а

$$n = \sum_{i=1}^N n_i;$$

$$D_p = \sum_{i=1}^N \frac{n_i}{n} D_{pi} + \sum_{i=1}^N \frac{n_i}{n} \left[\sum_{j \neq i}^N (\bar{p}_i - \bar{p}_j) \frac{n_j}{n_i} \right]^2;$$

$$\bar{k}_3 = \sum_{i=1}^N b_i \bar{k}_{3i},$$

$$\text{где } b_i = \frac{n_i \beta_i \bar{p}_i}{\sum_{i=1}^N n_i \beta_i \bar{p}_i};$$

$$D_{k3} = \sum_{i=1}^N \frac{n_i}{n} D_{k3i} + \sum_{i=1}^N \frac{n_i}{n} \left[\sum_{j \neq i}^N b_j (\bar{k}_{3j} - \bar{k}_{3i}) \right]^2.$$

В приведенных формулах индексация по типам двигателей опущена. В изложенном виде состав узла нагрузки может быть использован для определения параметров эквивалентных двигателей, регулирующих эффектов нагрузки, статических характеристик и т. п.

Вывод. Предложенный метод определения состава любого узла комплексной нагрузки путем статической обработки материалов по составу нагрузки различных предприятий — представителей отдельных отраслей народного хозяйства может быть применен для определения характеристик токоприемников, необходимых для учета их в различных задачах по расчету устойчивости, качества электроэнергии, надежности и т. д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kent M. M., Schmus W. R., McCrackin F. A., Wheeler L. M. Dynamic modeling of loads in stability studies. — «IEEE Transactions of PAS», 1968, № 5.
2. Азарьев Д. И., Дмитриева Г. А., Хвошинская З. Г. Влияние способов представления нагрузок на расчеты статической устойчивости сложных энергосистем. — «Электрические станции», 1972, № 10.
3. Гуревич Ю. Е., Либова Л. Е. Вопросы учета нагрузки в исследованиях сложных энергетических систем. — В сб.: Доклады на III Всесоюзном научно-техническом совещании по устойчивости и надежности энергосистем СССР. М., «Энергия», 1973.

[8.4.1974]



Автоматизация расчета параметров дистанционных защит линий 110 кВ и выше с использованием ЦВМ

КИМЕЛЬМАН Л. Б., БЫЧУЦКАЯ С. Р., ЛОСЕВ С. Б.

Москва

Основные положения. Для определения параметров защит линий в сложных сетях высокого напряжения требуется выполнение большого объема расчетов токов коротких замыканий в многочисленных различных режимах с последующим их анализом. За последнее время автоматизация этой работы осуществляется с использованием ЦВМ как в части выполнения расчетов токов коротких замыканий [Л. 1], так и в части упорядочения выдачи результатов этих расчетов [Л. 2]. Тем не менее остается весьма большой объем работы по определению конкретных расчетных условий и по подготовке соответствующих исходных данных для ЦВМ. В связи с этим стремятся свести к минимуму объем расчетов, а это понижает вероятность выявления наиболее тяжелых расчетных условий. Поэтому для повышения обоснованности выбора параметров защит и для избавления пользователя от необходимости выполнения весьма большого объема рутинной работы целесообразно обеспечивать максимальную автоматизацию расчетов для наиболее распространенных типов защит. К ним относится многоступенчатая дистанционная защита от многофазных коротких замыканий ЛЭП 110 кВ и выше.

В этой задаче расчеты производятся на базе периодических составляющих токов и напряжений для заданного момента времени (как правило, для $t=0$) в сети произвольной конфигурации, в которой все элементы с линейными сопротивлениями в виде комплексных величин приведены к одной ступени напряжения. Основные отличия рассматриваемого ниже решения от традиционного [Л. 6] вытекают из использования в качестве вычислительного средства ЦВМ, которая позволяет производить несомненно больший, чем ранее, объем расчетов (притом с комплексными величинами); допускается даже некоторая избыточность вычислений на ЦВМ с целью повышения степени автоматизации расчета и упрощения алгоритма.

Из-за высокой степени автоматизации расчетов исходные данные сведены к минимуму; в дополнение к сетевым данным (сопротивлениям ветвей, э. д. с. генераторов) требуется заданная небольшого объема «релейной» информации, касающейся в основном места установки и состава защит (с однофазным направленным реле сопротивления, с многофазным направленным реле сопротивления, с токовым реле), а также рабочих режимов (в которых нагрузочные составляющие могут быть учтены с помощью различающихся по величине и фазе э. д. с. генераторов и шунтов неизменного комплексного сопротивления). При этом программным путем обеспечивается автоматизация: а) учета расчетных условий для определения вариантов сопротивления срабатывания $Z_{с.з.}$ отдельных ступеней дистанционных защит, установленных на линиях с одной, двумя или большим числом питающих сторон и ответвлений; б) выбора

расчетных точек и видов коротких замыканий, а также сопротивления дуги R_d в месте повреждения; в) образования подрежимов, характеризующихся, например, каскадным отключением места повреждения, шунтированием защитным разрядником установки продольной емкостной компенсации (УПК) при близких коротких замыканиях, настройкой регулируемых ответвлений трансформаторов для получения расчетных условий; г) выбора параметров специальных характеристик третьих ступеней однофазных реле сопротивления для улучшения их отстройки от нагрузочного режима.

Для упрощения алгоритма автоматического поиска расчетных точек и мест каскадного отключения коротких замыканий упомянутая «релейная» информация организована в виде списка участков сети — «защищаемых» участков, содержащих линии с дистанционными защитами, параметры которых выбираются и с которыми производится согласование (см. рис. 1, участки с 1 по 8), а также «дополнительных» участков, не содержащих линии, но требующихся для топологических целей (см. рис. 1, участки с 9 по 12).

Расчеты выполняются в несколько проходов. В очередном проходе для всех дистанционных защит определяются параметры ступеней с одинаковым временем срабатывания ($t_{ср} \approx 0$; Δt ; $2\Delta t$; ...) на основании рассмотрения заданных рабочих режимов, которые могут меняться при переходе к очередному проходу. Время счета на ЦВМ несколько сокращается, если для отдельной защиты рассматривается только часть из всех заданных режимов. При этом требуется составление дополнительных списков режимов для защит отдельных участков.

Подрежимы. Значение сопротивления рассеяния трансформатора $Z_{тр}$ существенно зависит от положения регулируемого ответвления. В связи с этим предусмотрен автоматический учет одного из двух его предельных заданных значений ($Z_{тр \max}$; $Z_{тр \min}$) по следующему алгоритму. При определении $Z_{с.з.}$ по условию селективности (см. ниже) трансформаторы, которые находятся в контуре между местом установки защиты и местом короткого замыкания, учитывают их реактивными сопротивлениями $Z_{тр \min}$, а все остальные трансформаторы — $Z_{тр \max}$. Напротив, в расчетах по условию чувствительности трансформаторы в указанном контуре учитывают их реактивными сопротивлениями $Z_{тр \max}$, а все остальные — $Z_{тр \min}$.

В связи с этим перед выполнением расчетов по первому условию всем трансформаторам сети присваиваются их максимальные реактивные сопротивления, а по второму условию — их минимальные реактивные сопротивления. При этом для каждой точки короткого замыкания производится дополнительная подстройка сетевых данных в зависимости от места установки рассматриваемой защиты в соответствии с приведенным алгоритмом. Следует отметить, что с помощью приведенного алгоритма можно автоматизировать также образование подрежимов по включению некоторого числа параллельно работающих трансформаторов, представленных в схеме в виде одного эквивалентного трансформатора.

При наличии УПК в сети для каждой точки короткого замыкания после настройки сопротивлений трансформаторов автоматически производится проверка условия срабатывания разрядников УПК и при необходимости шунтируется этот элемент во всех трех фазах; при наличии нескольких УПК учитывается возможность цепного срабатывания разрядников отдельных УПК.

При вычислении параметров ступеней дистанционных защит с выдержкой времени программным путем создаются условия каскадного отключения места короткого замыкания более быстродействующими ступенями защит поврежденного участка. Чувствительность последних проверяется после настройки сопротивлений трансформаторов, а также возможного шунтирования УПК, так как считается, что шунтирование происходит практически при $t=0$, т. е. до отключения выключателей. Предусмотрена возможность учета программным путем и отказа выключателя.

Некоторые характеристики реле и защит. В расчетах учитывается область срабатывания реле сопротивления с граничной линией, определяемой уравнением $M=0$. Ниже приведены выражения условной электрической величины M для различных типов реле [Л. 3].

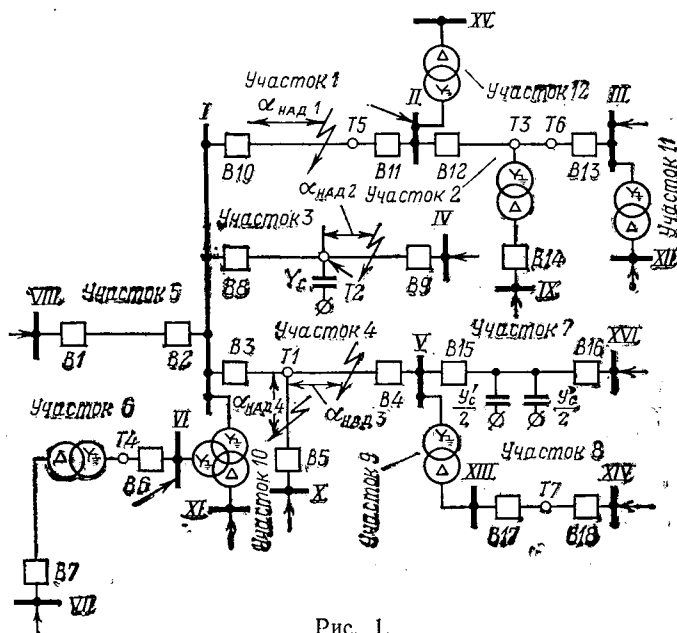


Рис. 1.

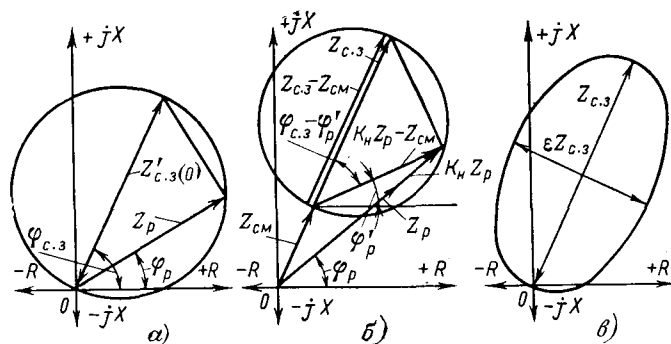


Рис. 2.

1. Для однофазного реле, включенного на фазы В и С с характеристикой в плоскости Z в виде окружности, проходящей через начало координат (см. рис. 2,а),

$$M \equiv \left| \frac{1}{2} Z_{c.3} \right| - \left| \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_2}{I_1 - I_2} - \frac{1}{2} Z_{c.3} \right| = |Z_I| - |Z_{II}|. \quad (1)$$

в виде окружности, смещенной в первый квадрант (см. рис. 2,б),

$$M \equiv \left| \frac{1}{2} (Z_{c.3} - Z_{cm}) \right| - \left| \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_2}{I_1 - I_2} - \frac{1}{2} (Z_{c.3} + Z_{cm}) \right|, \quad (2)$$

в виде эллипса (приближенно) с эксцентриситетом ε (рис. 2,в) и (1)]

$$M = M_1 - M_2 - M_3 \equiv |Z_I| - |Z_{II}| - \left(\frac{1 - \varepsilon}{1 + \varepsilon} \right) ||Z_{II}| - |Z_I| e^{j2\varphi}|, \quad (3)$$

где

$$\varphi = \arg Z_I - \arg Z_{II}. \quad (4)$$

2. Для многофазного реле сопротивления

$$M \equiv |\dot{U}_2 - Z_{c.3} I_2| - |\dot{U}_1 - Z_{c.3} I_1|. \quad (5)$$

В (1), (2), (5) $\dot{U}_1, \dot{U}_2; I_1, I_2$ — симметричные составляющие напряжения и тока, подводимых к защите, которые вычисляются при учете равенства сопротивлений прямой и обратной последовательностей на основании рассмотрения трехфазных коротких замыканий.

Последние рассчитываются с использованием наложения составляющих нагрузочного $[F^{(n)} = \dot{U}^{(n)}; I^{(n)}]$ и дополнительно $[F^{(3, \Delta)} = \dot{U}^{(3, \Delta)}; I^{(3, \Delta)}]$ режимов. При этом реализован алгоритм, близкий к используемому в [Л. 1].

В данном решении приходится хранить в памяти и перестраивать только схему прямой последовательности, что упрощает алгоритм и существенно улучшает характеристики программы в свете необходимости образования многочисленных подрежимов. При этом величины прямой последовательности при замыкании между тремя и двумя фазами

$$F_1^{(3)} = F^{(n)} + F^{(3, \Delta)}; \quad F_1^{(2)} = F^{(n)} + \frac{1}{2} F^{(3, \Delta)}, \quad (6)$$

а величины обратной последовательности при замыкании между двумя фазами

$$F_2 = \alpha_2 F^{(3, \Delta)}, \quad (7)$$

где $\alpha_2 = -1/2$ при замыкании между фазами В и С и отсутствии между местом установки защиты и точкой короткого замыкания трансформатора $Y/\Delta-11$; $\alpha_2 = 1/2, a/2, a^2/2$ при наличии последнего в случае установки защиты на стороне Y и короткого замыкания на стороне Δ между фазами соответственно $c-a, a-b, b-c$.

С помощью программы по заданному углу $\varphi_{c.3}^*$ вычисляются модули сопротивления срабатывания $Z_{c.3}$. Последние выявляются на основании сопоставления вариантов $Z_{c.3}$, которые получаются при рассмотрении различных условий коротких замыканий, автоматически определяемых программой.

* $\varphi_{c.3}$ представляет собой угол полного сопротивления компенсации и совпадает с углом максимальной чувствительности $\varphi_{м.ч}$ однофазных реле сопротивления.

Исходное значение варианта $Z'_{c.3(0)}$ получается по вычисленному значению сопротивления «на зажимах» реле

$$Z_p = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_2}{I_1 - I_2} \quad (8)$$

с характеристикой в виде окружности, проходящей через начало координат. При этом в соответствии с рис. 2,а

$$Z'_{c.3(0)} = \frac{Z_p}{\cos(\varphi_{c.3} - \varphi_p)}. \quad (9)$$

Для однофазных реле с характеристикой по рис. 2, б и в, а также для многофазного реле решение по (9) уточняется итерационным счетом (при $\dot{U}_1, \dot{U}_2, I_1, I_2 = \text{const}; \varphi_{c.3} = \text{const}$), который завершается, когда величина M соответственно по (2), (3) и (5) достаточно близка к нулю.

При определении в данном ходе работы программы $Z_{c.3}$ по условию селективности выявляются варианты $Z'_{c.3}$ с минимальным сопротивлением в трех наиболее тяжелых режимах, а по условию чувствительности — с максимальным сопротивлением. При этом с учетом коэффициента надежности

$$Z_{c.3} = K_n Z'_{c.3}, \quad (10)$$

где K_n обычно принимается равным 0,85 в первом случае и 1,2 во втором.

Из-за возможности учета различающихся по величине и фазе э. д. с. генераторов, а также комплексных сопротивлений возникают условия «комплексной» подпитки места короткого замыкания, в связи с чем угол $\varphi_{c.3}$ может существенно отличаться от φ_p (см. рис. 2,а). Поэтому при осуществлении ступени защиты с использованием одного однофазного реле и одного многофазного реле с разными характеристиками [см. (1) и (5)] найденные при одних и тех же условиях короткого замыкания значения $Z'_{c.3}$ этих реле могут отличаться. В программе выбирается минимальное из них в каждом отдельном режиме.

Наличие возможности учета «комплексной» подпитки требует уточнения и представлений о коэффициенте чувствительности K_χ вторых и третьих ступеней, так как при значении угла $\varphi_{c.3}$, существенно отличном от φ_p , для реле с характеристиками по рис. 2 обычно принятый коэффициент $K_\chi = Z_{c.3}/Z_p$ не дает правильных представлений. Например, из рис. 2,а следует, что $K_\chi = [\cos(\varphi_{c.3} - \varphi_p)]^{-1} > 1$, между тем реле на самом деле находится на границе срабатывания. В связи с этим в программе принято оценивать коэффициент чувствительности по радиусу от начала координат, на котором находится вектор Z_p , т. е.

$$K_\chi = \frac{Z_{c.3}(\varphi_p)}{Z_p}. \quad (11)$$

Значение модуля $Z_{c.3}(\varphi_p)$ для однофазного реле в соответствии с рис. 2,а

$$Z_{c.3}(\varphi_p) = Z_{c.3}(\varphi_{c.3}) \cos(\varphi_{c.3} - \varphi_p). \quad (12)$$

Для реле с характеристиками по рис. 2,б и в $Z_{c.3}(\varphi_p)$ определяется итерационным счетом соответственно по (2) и (3) при

$Z_{c.3}, Z_{cm}, \varepsilon = \text{const}; I_1 - I_2 = 1, 0; \dot{U}_1 - \dot{U}_2 = Z_{c.3} \angle \varphi_p$, причем $\varphi_p = \text{const}, Z_{c.3}(\varphi_p) = \text{var}$ с начальным приближением по (12). Так как многофазное реле не имеет стабильной характеристики, в итерационном расчете $Z_{c.3}(\varphi_p)$ используются значения $\dot{U}_1, \dot{U}_2; I_1, I_2$, получающиеся при замыкании между фазами В и С в заданной точке. При этом $\dot{U}_1, \dot{U}_2 = \text{const}$, а в i -м шаге ($i = 0, 1, 2, \dots$) в (5) учитывается $K_i I_1$ и $K_i I_2$ взамен I_1 и I_2 ; в качестве исходного приближения $K_0 = \cos(\varphi_{c.3} - \varphi_p)$. Искомое значение K_χ по (11) равно тому K_i^{-1} , при котором M приблизительно равно нулю [см. (5)].

Представляется, что K_χ по (11) не дает исчерпывающую оценку чувствительности реле к переходным сопротивлениям в месте короткого замыкания. В связи с этим дополнительно дается принципиально иное решение в виде предельной длины открытой дуги $l_{пр}$ при замыкании между двумя фазами, при

¹ Для однофазного реле со стабильными характеристиками по рис. 2,б и в в принципе могут производиться прямые, а не итерационные расчеты по зависимостям, более сложным, чем (9). Однако для упрощения общего алгоритма принят итерационный расчет, так как он все равно предусмотрен для многофазного реле, не имеющего стабильную характеристику.

оторой обеспечивается чувствительность реле в заданных условиях². При этом имеется в виду, что длина дуги имеет самостоятельное физическое значение. Так, в начальный момент короткого замыкания ее значение можно оценить по геометрическому расстоянию между двумя поврежденными фазами. Кроме того, известны [Л. 4] эмпирические данные, характеризующие кратность раздувания дуги за время 0,5—1,0 сек в зависимости от погодных условий [ориентировочно 1 раз в тихую погоду, 3—4 раза при небольшом ветре, 8—10 раз при сильном ветре], а также средние зависимости [Л. 5]:

$$K_d = 5 - 4e^{-t}. \quad (13)$$

Предельная же длина дуги [Л. 4]

$$l_{np} \approx \frac{\Delta U_{д.пр}}{1,05} = \frac{R_{д.пр} I_{к.з.пр}^{(2)}}{1,05} \quad (14)$$

пределяется на основании итерационного счета по (1)—(3) или 5) при $Z_{с.з.}, \epsilon, Z_{см} = \text{const}$ и $\dot{U}_1, \dot{U}_2, I_1, I_2 = \text{var}$ с учетом того, что ток в месте короткого замыкания

$$I_{к.з.}^{(2)} = \frac{\sqrt{3} U_K^{(H)}}{2Z_{1к.з.} + R_d}, \quad (15)$$

где $U_K^{(H)}$ — фазное напряжение нагрузочного режима в месте короткого замыкания; $Z_{1к.з.}$ — исходное сопротивление схемы прямой последовательности при металлическом коротком замыкании.

Считается, что реле обладает неограниченной чувствительностью к R_d при [Л. 4]:

$$\Delta U_{д.пр} = R_{д.пр} I_{к.з.пр}^{(2)} > 0,4 \sqrt{3} U_K^{(H)}. \quad (16)$$

Проход по определению сопротивления срабатывания первых ($Z_{с.з.}^I$) и вторых ($Z_{с.з.}^{II}$) ступеней дистанционных защит. В первой части прохода (1А) производится выбор $Z_{с.з.}^I$ первых ступеней для всех дистанционных защит, указанных в списке «защищаемых» участков. При этом для защиты простой линии автоматически рассматривается короткое замыкание на другом ее конце (для защиты В1 на рис. 1**, в точке I), а при наличии линии с ответвлениями — поочередно на остальных концах участка (для защиты В3 — в точках V и X). В первом случае достаточно рассматривать короткое замыкание в одном режиме; во втором — может потребоваться рассмотрение ряда режимов с различными условиями подпитки. Здесь и ниже, если специально не оговорено, вид короткого замыкания — металлическое замыкание между фазами В и С, а когда место установки защиты и точка короткого замыкания находятся на разных сторонах трансформатора Y/Δ—11 при выборе $Z_{с.з.}^I$ для однофазных реле — металлическое трехфазное короткое замыкание. При этом учитывается, что однофазное в отличие от многофазного реле чувствительно к фазовым искажениям трансформатора Y/Δ—11, причем многофазное реле не реагирует на трехфазные короткие замыкания [Л. 3].

Результаты прохода 1А выдаются на печать, а значения $Z_{с.з.}^I$ в наиболее тяжелых режимах автоматически записываются в память для использования в последующих расчетах $Z_{с.з.}^{II}$ (с $t_{ср} = \Delta t$), которые производятся во второй части прохода (1В) для всех дистанционных защит без прерывания работы программы. При этом рассматриваются: а) короткое замыкание на заданных шинах (например для защиты В1 на рис. 1 при коротких замыканиях в точках VI и XI, а также в точках II, IV, V и X, если считаются с возможностью длительного вывода быстродействующих защит соответствующих шин; для защиты В12 линии с ответвлением в виде трансформатора до-

² Для определения истинной длины дуги l'_{np} при коротком замыкании на ступени напряжения (II), приведенной к расчетной (I), используется формула

$$l'_{np} = \frac{U_{ном}(II)}{U_{ном}(I)} l_{np}.$$

** Здесь и ниже защита названа по обозначению выключателя, которым она управляет.

полнительно рассматривается короткое замыкание на его низшей стороне, т. е. в точке IX); б) короткое замыкание в конце зоны надежной работы защит (дистанционных, токовых) без выдержки времени на предыдущих участках.

В последнем случае при согласовании защиты В1 (рис. 1) с первой ступенью дистанционной защиты В10 простой линии I—II без учета ее емкостной проводимости автоматически рассматривается короткое замыкание в конце зоны надежной работы этой ступени $\alpha_{над1}$, определяемой при учете равенства углов полного сопротивления линии I—II и уставки защиты В10 по формуле:

$$\alpha_{над1} = \frac{K_{нс} Z_{с.з.}^I(B10)}{Z_{I-II}} I_{I-II}, \quad (17)$$

где $K_{нс}$ — коэффициент надежности, обычно задаваемый равным 0,9.

При согласовании с первой ступенью дистанционной защиты В8 (рис. 1) простой линии I—IV с учетом ее емкостной проводимости автоматически рассматривается короткое замыкание в промежуточной точке ветви T2—IV, определяемой $\alpha_{над2}$:

$$\alpha_{над2} = \frac{l_{I-IV}}{2Z_{T2-IV}} \frac{1}{\frac{1}{K_{нс} Z_{с.з.}^I(B8)} - Z_{T2-IV} - |y_c|}. \quad (18)$$

Соотношение (18) приближенно, так как получено в результате рассмотрения короткого замыкания в точке $\alpha_{над2}$ продольной ветви Т-образной схемы замещения линии и приравнивания сопротивления «на зажимах» реле сопротивлению $K_{нс} Z_{с.з.}^I(B8)$. (Более точный учет емкости линии достигается замещением ее двумя или большим числом Т-образных схем, см. рис. 1, участок 7.) Во всех остальных случаях точка надежной работы определяется итерационным счетом с использованием (1) и (5), в том числе когда предыдущий участок содержит три и более «линейных» ветвей, т. е. ветвей, не связанных с нулевой точкой (см. рис. 1, участки 2, 4, 7), а также когда согласование производится только с токовой защитой. Для защиты В3 (рис. 1) могут существовать две точки $\alpha_{над}$ — одна на ветви T1—V, а вторая на ветви T1—X. По алгоритму точка надежной работы не может находиться в трансформаторной ветви. В связи с этим, если защита В6 чувствительна к короткому замыканию в точке T4, то рассматривается короткое замыкание в этой точке через переходное сопротивление. Точка надежной работы для дистанционной защиты с одним однофазным реле по (1) и одним многофазным реле по (5) представляет собой более близкую точку, определяемую действием этих реле (считается, что однофазное реле действует при трехфазных коротких замыканиях точно так же, как при рассматриваемых коротких замыканиях между фазами В и С), а для токовой защиты — более отдаленную точку, определяемую действием реле ($I_\phi > I_{с.з.}$) в фазе В и в фазе С.

Программным путем предусматривается возможность отключения короткого замыкания действием защит на остальных концах поврежденного участка — при коротком замыкании в точке $\alpha_{над1}$ действием защиты В11; при коротком замыкании в точке $\alpha_{над2}$ ($\alpha_{над3}$) действием защит В4 и В5. Кроме того, в поисках наиболее тяжелых условий рассматривается и возможность отказа одного выключателя (в рассмотренных выше случаях В11, В4 или В5). При выборе $Z_{с.з.}^{II}$ в этом случае предусмотрена возможность учитывать дополнительный коэффициент $K_v \approx 0,95$ для обеспечения надежного возврата рассматриваемой защиты.

В результате подобных расчетов для каждой дистанционной защиты в списке «защищаемых» участков выявляется одна группа значений $Z_{с.з.}^{II}$, соответствующая трем наиболее тяжелым заданным режимам при учете возможности отказа одного выключателя, и вторая группа из трех значений $Z_{с.з.}^{II}$, в которой такой возможности не допускается. Чувствительность каждого из шести вариантов $Z_{с.з.}^{II}$ проверяется в конце работы по проходу 1В в одном заданном режиме при коротких замыканиях на удаленных концах защищаемого участка, но не за трансформатором, т. е. для защиты В6 в точке T4 вместо VII, а для защиты В12 в точке T3 вместо IX. Оценка производится с помощью коэффициента K_ϕ по (11), а также l_{np} по (14) с уче-

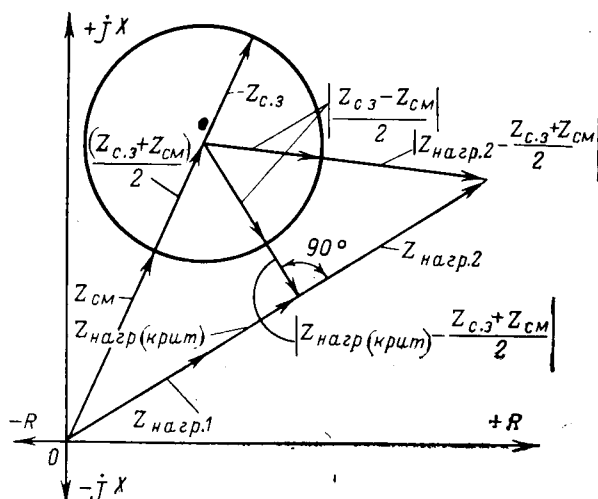


Рис. 3.

том и без учета каскадного отключения ближайшего к точке короткого замыкания выключателя поврежденного участка.

Если чувствительность оказывается недостаточной, то для отдельных защит можно выполнить самостоятельным проходом (2) расчеты в объеме прохода 1В. При этом можно снимать короткие замыкания в заданных фиксированных точках. Например, для защиты В1 при снятии короткого замыкания в точке II не считаются с возможностью возникновения короткого замыкания за время вывода защиты шин II; при снятии короткого замыкания в точке VI производится согласование с защитой В6. Можно снимать короткое замыкание и в точках надежной работы первой ступени защиты n предыдущего участка и провести согласование второй ступени рассматриваемой защиты p при $t_{cr}^{II}(p) \approx 2\Delta t$ со второй ступенью защиты n при $t_{cr}^{II}(n) \approx \Delta t$. При этом возникает задача о выявлении точки надежной работы защиты n , обладающей чувствительностью к металлическим коротким замыканиям во всех точках защищаемого участка.

При учете возможности отказа одного выключателя программа автоматически определяет точки надежной работы защиты n при металлическом коротком замыкании на смежных участках (например, для защиты $n=B10$ на участке 2 с отключенными выключателями В13 и В14; считается, что В12 отказал). Если не допускается возможность отказа выключателя, то точка надежной работы находится лишь при коротком замыкании между фазами через переходное сопротивление R_d . Программным путем устанавливаются эти точки на линейной стороне выключателей дальних концов участка с защитой n , причем предельное значение R_d определяется итерационным счетом по (1) и (5) при каскадном отключении места короткого замыкания по условиям с $R_d=0$. Например, для защиты $n=B10$ рис. 1 рассматривается короткое замыкание между фазами В и С в точке Т5 при отключенном выключателе В11, но для защиты $n=B6$ — в точке Т4 на высшей стороне трансформатора при отключенном выключателе В7. [Отметим, что для больших значений R_d , при котором удовлетворяется (16), принципиально исчезает расчетная точка короткого замыкания.] Для защиты $n=B17$ на стороне Δ трансформатора $Y/\Delta=11$ автоматически рассматривается короткое замыкание через R_d между фазами А и В, а также В и С, в точке Т7 при выборе $Z_{с.з}^{II}$ (при $t_{cr}^{II} \approx 2\Delta t$) защит В3, В5 и В16 на стороне У.

Проходы по определению сопротивления срабатывания третьих ступеней дистанционных защит. В одном проходе (3В) выявляются по условию обеспечения чувствительности к металлическим трехфазным коротким замыканиям в конце зоны резервирования защиты варианты $Z_{с.з}^{III}$ однофазных реле с максимальными значениями в трех наиболее тяжелых режимах. При этом для защиты В10 (рис. 1) автоматически рассматриваются короткие замыкания в точке XV, а также в Т6 и Т3 (т. е. на данной ступени напряжения трансформаторного ответвления смежного участка) при отключенных выключателях В13 и В14. Для защиты В12 рассматриваются

короткие замыкания в точке XII, а также в IX (т. е. на другой ступени напряжения трансформаторного ответвления данного участка).

При коротком замыкании в очередной точке для реле с характеристикой по рис. 2, а вычисляется Z_p по (8) и $Z_{с.з}^{III}$ по (10) [с учетом (8) и (9)]; кроме того, проверяется отстройка реле с

вычисленным значением $Z_{с.з}^{III}$ от заданного вектора сопротивления нагрузочного режима $Z_{нагр}^{***}$.

В последнем расчете по (1) учитываются дополнительные коэффициенты надежности, уменьшающие $Z_{нагр}=Z_p$ [см. (8)] и увеличивающие $Z_{с.з}^{III}$. При отсутствии отстройки автоматически рассматривается вариант однофазного реле с характеристикой по рис. 2, б или 2, в.

В последнем случае проверяется отстройка при последовательных значениях эксцентриситета $\epsilon=0,8; 0,65; 0,5$ [см. (3)]. Для этого при очередном значении ϵ по вычисленному вектору Z_p [см. (8)], увеличенному в $K_{н3}=1,2$ раза, на основании итерационного счета по (3) определяется $Z_{с.з}^{III}$. Затем по (3) проверяется отстройка от $Z_{нагр}$ реле с вычисленным значением $Z_{с.з}^{III}$, причем для запаса при M_2 учитывается дополнительный множитель $K_n < 1$.

Для реле с характеристикой по рис. 2, б проверяется отстройка при последовательных значениях $Z_{см}=nZ_{с.з}^I$ ($n=0, 1; 0, 2, \dots, 1, 0$). При очередном значении $Z_{см}$ по вычисленному вектору Z_p [см. (8)] определяется $Z_{с.з}^{III}$ (см. рис. 2, б):

$$Z_{с.з}^{III} = Z_{см} + \frac{|K_{н3}Z_p - Z_{см}|}{\cos(\varphi_{с.з} - \varphi_p)}. \quad (19)$$

При проверке отстройки реле с характеристикой по рис. 2, б считаются только с возможностью увеличения $Z_{нагр}$ по модулю. В связи с этим при $Z_{нагр1} < Z_{нагр(крит)}$ ($Z_{нагр(крит)}$ — вектор с концом, наиболее близким к смещенной окружности, — см. рис. 3) принимается $Z_{нагр}=Z_{нагр(крит)}$, и в соответствии с (2) обеспечивается отстройка при

$$\left| Z_{нагр(крит)} - \frac{Z_{с.з}^{III} + Z_{см}}{2} \right| > \frac{1}{K_n} \left| \frac{Z_{с.з}^{III} - Z_{см}}{2} \right|, \quad (20)$$

где $K_n < 1$ — коэффициент запаса, увеличивающий радиус окружности на рис. 3.

Напротив, при $Z_{нагр2} > Z_{нагр(крит)}$ (см. рис. 3) принимается $Z_{нагр}=Z_{нагр2}$ и отстройка проверяется по (20) при замене $Z_{нагр(крит)}$ на $Z_{нагр2}$.

В другом проходе (3С) выявляются по условию селективности варианты $Z_{с.з}^{III}$ однофазного реле с минимальными значениями

в трех наиболее тяжелых режимах как при учете возможности отказа выключателя, так и без учета ее. При этом согласование производится со ступенями защит с $t_{cr} \leq t_{cr}^{III} - \Delta t$ на предыдущих участках, не считая трансформаторов, т. е. согласование защиты $p=B1$ (рис. 1) производится не только с защитами $n=B10, B8, B3$, но и с защитой $n=B6$. Условия коротких замыканий — как в локальных проходах для определения $Z_{с.з}^{II}$ при $t_{cr} \approx 2\Delta t$. В данном случае, как и при выборе уставок по чувствительности, допускается использование характеристик по рис. 2, б и в для отстройки от $Z_{нагр}$. При этом $Z_{с.з}^{III}$ определяется при учете $K_{н3} \approx 0,85$ (вместо 1,2).

Вспомогательные проходы. В указанных проходах определяется дополнительная информация, которая может оказаться необходимой при выборе уставок отдельных ступеней дистанционных защит.

В одном проходе (3А) производится проверка чувствительности выбранных вторых ступеней в объеме, выполненном в конце проходов 1В и 2, но при рассмотрении целого ряда заданных режимов. Проверяется чувствительность этих ступеней и по току точной работы при коротком замыкании на

***Аналогичная проверка $Z_{с.з}^{II}$ производится в конце прохода 1В, но только в отношении двух групп, содержащих по три выявленных варианта сопротивления срабатывания.

отдаленных концах защищаемого участка³. Чувствительность оценивается по коэффициенту

$$K_{\text{чт}} = I_{\text{защ}} / I_{\text{з.т}}, \quad (21)$$

где $I_{\text{защ}}$ — эквивалентный первичный фазный ток, равный $|I_1 - I_2|$ для однофазного реле и $(\sqrt{3}/2) |I_1 - I_2|$ для трехфазного реле; $I_{\text{з.т}} = n_{\text{т}} I_{\text{ф.тр}}$ — приведенный к первичной стороне заданный ток в одной из обмоток трансформатора, обеспечивающий точную работу защиты, причем $I_{\text{ф.тр}}$ получается из справочной литературы.

Кроме того, выявляется возможность срабатывания второй ступени защиты p при замыкании между фазами в месте установки защиты n предыдущего участка через такую дугу, при которой оказывается нечувствительной ступень защиты n (дистанционной, токовой) с временем срабатывания $t_{\text{ср}(n)} \leq t_{\text{ср}(p)} - \Delta t$. На печать выдается диапазон изменения длины этой дуги, при котором возможно неселективное срабатывание защиты p , что позволяет судить о вероятности такого действия. Наконец, предусмотрена возможность производить проверку отстройки выбранных первых и вторых ступеней от заданных условий асинхронного режима.

При наличии УПК в сети можно выполнить специальные расчеты по проверке отстройки дистанционных защит от дальних точек коротких замыканий. При выполнении прохода 4А проверяются выбранные первые ступени при заданных автоматически коротких замыканиях на шинах, а также в промежуточных точках линий (за исключением защищаемой). Рассматривается и случай опробования линии на неустранившееся короткое замыкание. Проверка вторых ступеней в проходе 4В производится без учета возможности отказа выключателей. При этом для ступеней с $t_{\text{ср}}^{\text{II}} \approx \Delta t$ автоматически задается короткое замыкание на линейной стороне каскадно отключенного выключателя (при наличии трансформаторного отключения — на его стороне Y , в частности через R_d), на шинах, а также в точке надежной работы первой ступени защиты других участков; для ступеней с $t_{\text{ср}}^{\text{II}} \approx 2\Delta t$ последний случай снимается, а в остальных случаях рассматриваются короткие замыкания через R_d .

Рассматриваемая задача реализована на ЦВМ БЭСМ-4 для сети с 90—100 узлами. При этом использование ЦВМ не только обеспечивает достаточно высокую степень автоматизации самих расчетов параметров дистанционных защит, но также в сравнении с традиционной вычислительной практикой позволяет учитывать дополнительные уточняющие факторы, основные из которых приведены ниже.

1. При определении токов и напряжений, подводимых к защите, учитываются сопротивления ветвей и э. д. с. генераторов в виде комплексных величин.

³ Такая же проверка производится при коротком замыкании в выявленных точках надежной работы вторых ступеней в проходе 3С; в проходе 1В производится аналогичная проверка для первых ступеней при коротких замыканиях в их точках надежной работы. При этом на печать выдаются только те случаи, в которых $K_{\text{чт}}$ по (21) меньше наперед заданного числа $K_{\text{чт}}(\text{печ})$.

2. Действие защиты определяется точными статическими характеристиками ее измерительных органов (1) — (5).

3. В месте короткого замыкания учитывается дуга, а также комплексная подпитка ее и поврежденного участка. При этом согласование рассматриваемой защиты со второй (третьей) ступенью защиты предыдущего участка производится с учетом переходного сопротивления; кроме того, проверка отстройки выбранной второй ступени от первой ступени предыдущего участка производится при коротком замыкании через дугу в начале предыдущего участка.

4. Чувствительность защиты оценивается либо коэффициентом с учетом зависимости сопротивления срабатывания от угла сопротивления «на зажимах» реле (11), либо предельной длиной дуги, охватываемой защитой, в расчетной точке короткого замыкания.

5. Согласование защит производится при наиболее тяжелых, но реальных, условиях, определяемых путем автоматического установления места (а иногда и вида) повреждения, положения регулируемого ответвления трансформаторов и каскадного отключения места короткого замыкания (в частности с возможностью отказа одного выключателя).

6. При отсутствии отстройки от нагрузочного режима однофазного реле с характеристикой по рис. 2а автоматически выбираются параметры реле с характеристикой по рис. 2б или 2в, обеспечивающие такую отстройку. Проверяется отстройка реле от условий асинхронного хода.

7. При перенапряжении на УПК в режиме короткого замыкания автоматически осуществляется его шунтирование для обеспечения реальных расчетных условий. Кроме того, предусмотрена проверка выбранных уставок при удаленных коротких замыканиях и незашунтированных УПК с учетом искажающего действия последних.

Цель автоматизированного расчета параметров защит на ЦВМ — помочь специалисту по релейной защите, а не его замена. В связи с этим для отдельных ступеней каждой защиты определяются три, а иногда и шесть вариантов уставок, из которых специалистом выбираются расчетные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кимельман Л. Б., Лосев С. Б., Плотников В. Г. Усовершенствованные алгоритмы для комплексных расчетов всех видов к. з. в сложных сетях на ЭЦВМ. — «Труды ЭСП», 1971, вып. 2.
2. Лосев С. Б., Бычуцкая С. Р., Плотников В. Г., Родионова Л. С. Упорядоченная выдача результатов расчетов токов к. з. на ЦВМ для автоматизации проектирования релейной защиты. — «Труды ЭСП», 1974, вып. 4.
3. Федосеев А. М. Основы релейной защиты. М. — Л., Госэнергоиздат, 1961.
4. Бургсдорф В. В. Открытые электрические дуги большой мощности. — «Электричество», 1948, № 10.
5. Майкопар А. С. Дуговые замыкания на линиях электропередачи. М., «Энергия», 1965.
6. Руководящие указания по релейной защите. Дистанционная защита линий 35—330 кв. М., «Энергия», 1966, вып. 7.

[13.11.1973]



Распределение тока униполярной короны на некоронирующем и коронирующем электродах

Академик ПОПКОВ В. И., инж. РЯБАЯ С. И.

Москва

В последнее время наблюдается известное возрождение интереса к вопросам теории, физического механизма и практических характеристик короны, рассматривавшихся в отечественной литературе и приведших к определенным представлениям еще много лет тому назад. Новые публикации отнюдь

не всегда расширяют уже известные сведения; подчас это повторение или вариации уже пройденного или демонстрация весьма начальных стадий исследования [Л. 1—3 и др.]. Все это побудило авторов настоящей статьи вернуться к работам, выполненным ими в указанный период, но не получившим до

сих пор освещения в печати, тем более что их результаты, по мнению авторов, продолжают оставаться оригинальными.

Систематические исследования униполярной и биполярной короны, проведенные при напряжениях до 1000 кВ между проводами (± 500 кВ), позволили выяснить вопросы методики измерений короны в закрытом помещении, распределение тока униполярной короны на уровне земли и у провода, особенности вольт-амперных характеристик униполярной и биполярной короны и параметров их расчетных уравнений в различных условиях, а также вопросы обобщения измеренных характеристик в критерияльных координатах.

В методических целях измерения производились с тонкими, гладкими, медными проводами диаметром 3,05 мм и со сталь-алюминиевыми проводами практической конструкции сечением 400 мм² (АСУ-400) и диаметром 29,3 мм. В отдельных случаях применялись и иные конструкции проводов.

Исследования короны в закрытом помещении имеют то преимущество по сравнению с опытами в наружных условиях, что позволяют исключить влияние трудно учитываемых метеорологических факторов и изменения состояния поверхности проводов, затрудняющих получение устойчивых и воспроизводимых результатов. Видимо, влиянием подобного рода факторов в сочетании с примитивностью анализа измеряемых характеристик короны можно объяснить некоторые малообоснованные суждения в [Л. 4].

Недостатком измерений в закрытом помещении является влияние на поле проводов окружающих предметов — стен, сводов и т. п., устранение или ослабление которого требует специальных мер. Все это определило выбор масштабов опыта и габаритных размеров и потребовало значительного внимания к вопросам методики измерений.

Исследовалась схема провод — плоскость (земля) при униполярной или два провода — плоскость при биполярной короне. Сказанное определило как схему измерений, так и аранжировку эксперимента. Напряжение на провода подавалось от одной или двух каскадных конденсаторно-кенотронных схем умножения напряжения (схема Грейнахера — Комрофта и Уолтона) с номинальным напряжением ± 600 кВ. Питание схем умножения производилось от трансформатора с грубым и тонким регулированием напряжения, работавшим в параллель с генератором высокой частоты (ГВЧ), питавшим цепи накала кенотронов. Проникновение высокой частоты в цепи измерения предотвращалось запирающими индуктивностями.

Измерение высокого напряжения осуществлялось двумя независимыми методами: омическими делителями напряжения из отдельных сопротивлений, собранных в виде спирали, заключенной в систему внешних экранирующих кольцевых электродов, и электростатическим роторным вольтметром (ЭРВ), расположенным в отдельном экранированном помещении. Потенциал на электроды ЭРВ подавался через высоковольтные проходные изоляторы. Для измерения напряжения к делителям со стороны низкого напряжения подключалась компенсационная схема, позволявшая уверенно регистриро-

вать изменение на 1 кВ при общем потенциале 500 кВ. Чувствительность измерительного прибора ЭРВ на предельное напряжение до 600 кВ (± 300 кВ) составляла 1,5 деления/кВ. Расхождение в показаниях измерения обеих систем при предельных напряжениях не превышало 2%.

Измерение токов короны производилось как со стороны земли в заземленной плоскости $I_{кз}$, так и с высокой стороны, непосредственно в каждом из проводов двумя экранированными приборами с дистанционно-изменяемой чувствительностью; один из приборов стрелочный, второй — регистрирующий самописец. Отдельно измерялись токи утечек по гирляндам. Даже при испытаниях под дождем ток утечки не превышал 5% от измеряемого тока короны. Общий размер зала 24×12 м². Длина испытываемых проводов — 14 м, расстояние между проводами могло изменяться от 0,5 до 6 м, расстояние провод — земля — от 0,5 до 4,5 м. На полу зала располагалась металлическая плоскость, изолированная от пола. Рабочая (измерительная часть) заземленной (через прибор) плоскости размером 6×12 м² по концам дополнялась экранирующими заземленными плоскостями длиной по 6 м с каждой стороны.

Униполярная корона. Предварительные эксперименты. Влияние стен и сводов здания. При открытом расположении проводов в условиях лабораторного помещения наличие стен и сводов здания, искажая поле между исследуемыми электродами, может отразиться на результатах исследований. В особенности это имеет значение для схемы электродов провод — земля, где возможность таких искажений ограничивает наибольшую высоту провода над плоскостью.

Серия экспериментов была проделана при схеме один провод — плоскость с круглыми полированными медными проводами диаметром 3,05 мм. Эксперименты заключались в измерении вольт-амперных

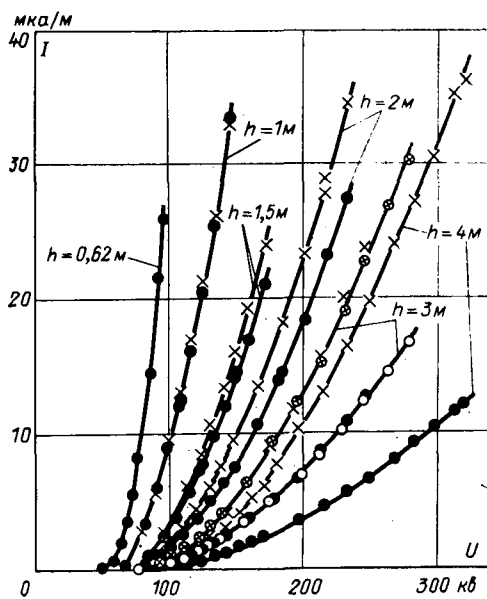


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики.

Отрицательная полярность. Провод медный диаметром 3,05 мм.
● — ток в плоскости; × — ток в проводе; ○ — ток в плоскости;
⊗ — ток в проводе. (В двух последних случаях провода смещены в горизонтальной плоскости на 2,25 м.)

характеристик короны при различной высоте провода h , изменявшейся в пределах от 0,62 до 4,5 м, причем ток, как уже отмечалось, измерялся в проводе $I_{пр}$ и плоскости $I_{пл}$.

При наличии влияния стен или сводов, очевидно, должно быть $I_{пр} > I_{пл}$ за счет тока, замыкающегося на стены и своды зала. Здесь, так же как и далее, имеются в виду токи на единицу длины провода или плоскости.

Серия измеренных характеристик для отрицательной полярности провода приведена на рис. 1. Аналогичные измерения при положительном проводе дали сходные результаты. Как видно на рис. 1, влияние сводов и стен обнаруживается уже при высоте $h > 1,5$ м, а при $h \geq 3$ м расхождение $I_{пр} > I_{пл}$ становится значительным. Интересно отметить, что при неизменной высоте h смещение в известных пределах провода в горизонтальной плоскости практически не отражается ни на токе $I_{пр}$, ни на токе $I_{пл}$. Все же данные рис. 1, характеризующие качественно наличие влияния окружающих предметов, не определяют размеры этого влияния. Количественный ответ дают результаты анализа характеристик, приведенных на рис. 1, и ряда других аналогичных измерений, методом построения спрямленных так называемых редуцированных характеристик вида $\frac{I/B}{U} = f(U)$.

Исследование вольт-амперных характеристик методом построения линий $\frac{I/B}{U}(U)$ было предложено в [Л. 5], но в данной статье этот метод получил дальнейшее развитие, поэтому напомним основные его положения.

Исходным является приближенное уравнение вольт-амперной характеристики униполярной короны для схемы провод — плоскость [Л. 5] вида:

$$I = BGU(U - U_0), \text{ а/м}, \quad (1)$$

где G — крутизна вольт-амперной характеристики,

$$G = \frac{9,8 \cdot 10^2 s_0 k}{\delta h^2 \ln \frac{r_0}{r_0}}, \text{ а/м} \delta^2; \quad (2)$$

U и U_0 — соответственно приложенное и начальное (критическое) напряжение, в; r_0 — радиус провода и h — высота его оси над землей, см; k — подвижность ионов, см²/(в·сек); δ — относительная плотность газа; поправочная функция

$$B = 1,05 \frac{U_0}{U} \frac{\alpha/4}{\ln \frac{2}{\sqrt{\alpha+1}+1} + \sqrt{\alpha+1}-1}, \quad (3)$$

здесь

$$\alpha_0 = \frac{3,3 \cdot 9 \cdot 10^{11} \delta}{k} I \left(\frac{h/r_0}{E_0} \right)^2. \quad (4)$$

Уравнение (1), не являясь строгим в теоретическом отношении для схемы провод — плоскость, имеет бесспорное достоинство, открывая возможность анализа измеряемых вольт-амперных характеристик. Что касается критериального представления тока короны в виде (4), то оно более строго. Аналогичное по структуре выражение было получено позднее [Л. 8] иным и в теоретическом отношении более строгим методом.

Построение по данным опыта редуцированной характеристики

$$\frac{I/B}{U} = G(U - U_0) \quad (5)$$

позволяет прежде всего определить: соответствие вида вольт-амперной характеристики по уравнению (1) с действительной характеристикой, если данные опыта, представленные в координатах уравнения (5), расположатся на прямой линии; величину начального или критического напряжения короны U_0 по точке пересечения с осью U редуцированной характеристики или ее продолжения; эффективную или расчетную величину подвижности ионов k по крутизне G опытной редуцированной характеристики и уравнению (2). Поскольку B является функцией, хотя и слабой, и тока и напряжения, построение линий $\frac{I/B}{U} = f(U)$ производится методом последовательных приближений.

Положив в первом приближении $B=1$, получим первый вариант параметров U'_0 и k' . С их учетом подсчитывается B'' и строится новая линия вида (5), что дает новый вариант параметров U''_0 и k'' и т. д. до получения совпадающих значений $U_{0n} = U_{0(n-1)}$ и $k_n = k_{n-1}$. Обычно уже четвертое приближение практически совпадает с третьим. Пределы и степень соответствия опыту расчетного уравнения (1) определяются тремя критериями: областью прямолинейности окончательного варианта линии $\frac{I/B}{U}(U)$ и резонансностью соответствующих ему параметров k и U_0 , в частности соответствие данным независимых опытов.

Указанный метод последовательного приближения редуцированных характеристик отличается от описанного ранее [Л. 5] вариацией не только U_0 , но одновременной вариацией также и k , т. е. является более строгим критерием согласия используемой аппроксимации с опытом. В дальнейшем мы вернемся к результатам такого анализа. Влияние же окружающих провод предметов количественно иллюстрируется отношением крутизны экспериментальных характеристик, определенных по измерениям токов короны в проводе и в плоскости земли $G_{пр}/G_{пл}$, показанным на рис. 2 для разных высот провода и обеих полярностей напряжения.

Если ограничить измерения высотами от 0,5 до 1,5 м согласно рис. 2, соответственная ошибка в оценке крутизны G возрастет от 0 до 15% и при усреднении данных в пределах указанных высот максимальная ошибка в оценке G не превысит 7,5%.

На рис. 3 приведены для иллюстрации несколько редуцированных указанным методом вольт-амперных характеристик рис. 1 по измерениям тока в плоскости. Условие прямолинейности удовлетворяется во всем диапазоне напряжений на проводе.

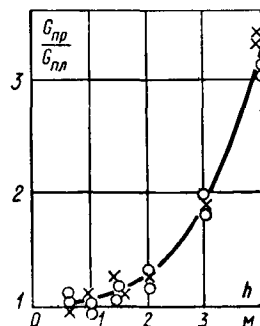


Рис. 2.

× — положительная полярность; ○ — отрицательная полярность.

Таблица 1

Положительная корона

$h, м$	$U_0, кВ$	$E_0, кВ/см$	$G, 10^4 \frac{мкА}{м \cdot кВ^2}$	$k, см^2/(в \cdot сек)$
0,62	60,6 60,0	59,6 59,0	54,2 53,5	1,595 1,57
1,0	65,5 66,2	60,0 61,0	17,0 17,6	1,33 1,44
1,5	68,4 70,7	59,5 61,6	7,1 7,26	1,365 1,415

В табл. 1 и 2 указаны значения k и $E_0 = \frac{U_0}{r_0 \ln \frac{2h}{r_0}}$ по окончательным приближениям линий $I/B = f(U)$.

Средние значения k , определенные по методу наименьших квадратов, оказываются соответственно равными $k^+ = 1,46 \pm 0,0966$ и $k^- = 1,76 \pm 0,137$. Эти цифры хорошо согласуются как с известными справочными данными, относящимися к чистым физическим условиям опыта, так и с подвижностями, определенными ранее независимым методом для положительной и отрицательной короны [Л. 7].

Распределение тока униполярной короны в плоскости земли. Выяснение закона распределения плотности тока короны в плоскости земли представляет интерес как в практическом, так и в теоретическом отношениях. Практически это важно в связи с возможным влиянием тока короны линий постоянного напряжения на биологическую среду, блуждающие токи в земле и т. п. В теоретическом плане интересно выяснить соответствие фактического распределения с теоретическим, вытекающим из закономерностей, находимых при так называемом θ -допущении. Распределение плотности тока короны было измерено¹ на проводах диаметром 1,02 и 3,03 мм при пяти высотах провода над плоскостью от 0,5 до 1,5 м и в широких пределах тока короны от 8,5 до 400 мкА/м. В общей сложности распределение по всей измерительной плоскости было определено при 40 вариациях указанных величин r_0 , h и I .

¹ В экспериментах принимал участие [Зябкин И. К.]

Таблица 2

Отрицательная корона

$h, м$	$U_0, кВ$	$E_0, кВ/см$	$G, 10^4 \frac{мкА}{м \cdot кВ^2}$	$k, см^2/(в \cdot сек)$
0,62	64 63 59,5	62,7 61,7 58,4	58,1 66,0 53,0	1,73 1,965 1,572
1,0	65,2 63,5	59,7 58,2	19,9 21,8	1,64 1,825
1,5	75,4 73,5	65,4(?) 63,5(?)	8,9 9,32	1,735 1,855

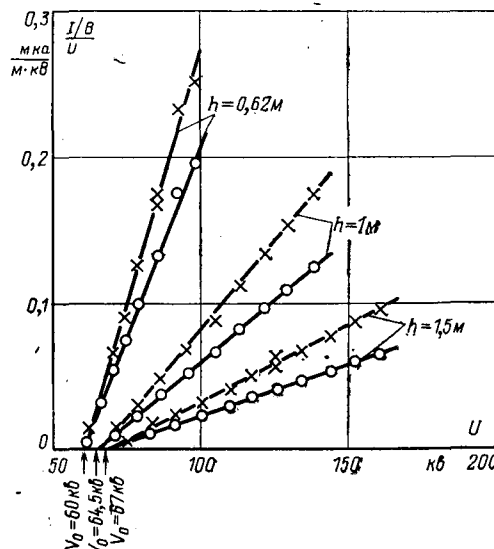


Рис. 3. Положительная полярность.

Провод диаметром 3,03 мм; редуцированные характеристики; × — первое приближение; ○ — окончательное приближение.

В каждом опыте поддерживалось неизменным напряжение на проводе и измерялись последовательно токи в отдельном экранированном элементе, накладываемом на каждую из измерительных пластин при заземленных (через общий прибор) остальных пластинах, как это показано схематически на рис. 4. Измеренный ток пластины i , разделенный на площадь пластины, давал среднее значение плотности тока j_s , которое относилось к координате Y середины соответствующей пластины.

Распределение плотности тока по поверхности земли выражалось в безразмерных координатах $\frac{j_s h}{I} = f(Y/h)$ (I — суммарный ток в плоскости).

В табл. 3 приведены результаты всех измерений в пределах Y/h от 0 до 4,5 м и соответственно величины $\frac{j_s h}{I}$, изменяющейся от 0,765 до 0,000965.

Каждое значение $\frac{j_s h}{I}$ в табл. 3 является среднеквадратичной величиной из ряда измерений, проведенных при данном значении Y/h . На рис. 4 построена кривая 1 распределения по данным табл. 3 с указанием пределов среднеквадратичного отклонения

Таблица 3

Y/h	$\frac{j_s h}{I}$	Y/h	$\frac{j_s h}{I}$	Y/h	$\frac{j_s h}{I}$	Y/h	$\frac{j_s h}{I}$	Y/h	$\frac{j_s h}{I}$	Y/h	$\frac{j_s h}{I}$
0	0,765	0,332	0,58	0,665	0,314	1,038	0,135	1,63	0,0394	2,68	0,00625
0,0695	0,736	0,346	0,592	0,69	0,282	1,04	0,138	1,651	0,038	2,89	0,0044
0,083	0,794	0,415	0,516	0,726	0,266	1,075	0,122	1,66	0,0302	3,02	0,00451
0,104	0,757	0,417	0,532	0,741	0,274	1,139	0,1042	1,755	0,032	3,154	0,00386
0,1395	0,715	0,445	0,51	0,745	0,265	1,158	0,1008	1,775	0,0298	4,5	0,000965
0,1485	0,774	0,485	0,45	0,76	0,2425	1,185	0,1025	1,855	0,02045		
0,167	0,74	0,498	0,44	0,83	0,214	1,241	0,0825	1,92	0,0221		
0,208	0,681	0,519	0,424	0,89	0,2	1,245	0,082	2,06	0,01715		
0,209	0,691	0,554	0,391	0,815	0,1825	1,33	0,075	2,07	0,0146		
0,25	0,668	0,581	0,372	0,91	0,174	1,343	0,0675	2,118	0,01625		
0,276	0,64	0,592	0,38	0,934	0,1678	1,445	0,0565	2,28	0,0125		
0,298	0,656	0,622	0,337	0,965	0,152	1,455	0,0477	2,48	0,0088		
0,312	0,611	0,624	0,362	0,995	0,146	1,48	0,0512	2,5	0,008		
				1,037	0,132	1,548	0,0455	2,52	0,00858		

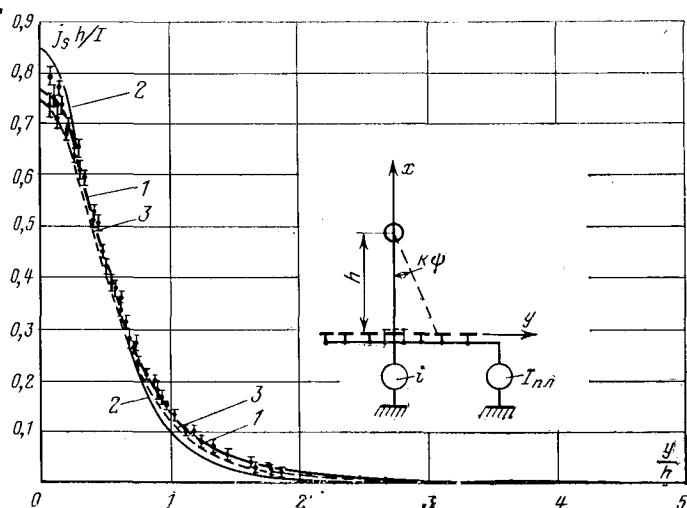


Рис. 4. Кривая распределения тока в плоскости земли.
Кривая 2 — подсчитана по уравнению (10) [Л. 6].

$\frac{j_s h}{I}$. Как видим, распределение $\frac{j_s h}{I} (Y/h)$ является инвариантным в отношении интенсивности короны (I, U) и геометрии электродов (r_0, h). В свое время на обнаружение нами экспериментально и теоретически этой инвариантности была ссылка в [Л. 6].

Очевидно, $\int_0^\infty \frac{j_s h}{I} d(Y/h) = 0,5$. Площадь кривой 1 рис. 4 оказывается равной 0,54, что вызвано, возможно, влиянием конечности ширины измерительных пластин и изоляционных зазоров между ними. Однако расхождение (8%) является скорее иллюстрацией достаточной тщательности измерений.

Обсуждение результатов. Теоретически инвариантность распределения $\frac{j_s h}{I} = f(Y/h)$ была

впервые показана в работе одного из авторов весьма давно [Л. 8], но осталась, видимо, незамеченной в литературе. Она была получена при решении общей задачи о поле и вольтамперной характеристике униполярной короны на основе предложенного так называемого θ -метода, т. е. допущения о консервативности формы силовых линий поля коронирующих электродов:

$$\vec{E}_2 / \vec{E}_1 = \theta, \quad (6)$$

где \vec{E}_2 — вектор напряженности поля коронирующего электрода, определяемый решением уравнения Пуассона; \vec{E}_1 — то же для той же системы электродов

при отсутствии короны — уравнение Лапласа; θ — неизвестная скалярная функция координат.

Решение уравнения Пуассона с учетом

$$\text{div } \vec{j} = 0; \quad \text{rot } \vec{E}_2 = \text{rot } \vec{E}_1 = 0$$

приводит к общему выражению:

$$\frac{j_s}{I} = \frac{1}{\oint_s \frac{E_{1s}}{E_1} \frac{dl}{\int_k \frac{dl}{E_1}}}, \quad (7)$$

где индексы k и s относят соответствующие величины к коронирующему электроду и к эквипотенциалу s , в частности к некоронирующему электроду; dl — элемент длины силовой линии.

Решение задачи для системы провод—плоскость дано в безразмерных координатах $2K\varphi$ и $2K\psi$ (числа Ламе для биполярных координат), где $2K = \frac{\ln 2h/r_0}{U}$;

φ — потенциал поля и ψ — функция потока. При условии $r_0/h \ll 1$ уравнение (7) приводится к виду [Л. 8]:

$$\frac{j_s h}{I} = \frac{1}{8} \frac{\sin^2 2K\psi (1 + \cos 2K\psi)}{1 - 2K\psi \text{ctg } 2K\psi}; \quad (8)$$

$$K\psi = \text{arctg } Y/h.$$

Значение $2K\psi$ на уровне земли ясно из рис. 4. Из уравнения (8) однозначно следует инвариантность распределения $\frac{j_s h}{I} = f(Y/h)$. Кривая распределения по уравнению (8) (кривая 3), приведенная на рис. 4, находится в хорошем согласии с данными наших экспериментов. В частности, на центральной силовой линии под осью провода ($Y/h=0$) согласно (8)

$$\lim_{2K\psi \rightarrow 0} \frac{j_s h}{I} = 0,75 \quad (9)$$

при экспериментально найденном значении 0,765, т. е. расхождение теории и опыта здесь всего 2%. Примерно 86% тока протекает в пределах Y/h от 0 до 1, т. е. на ширине, равной высоте провода, и практически весь ток—97% протекает на ширине $Y=2h$. Теоретически более строгое решение задачи [Л. 6] в качестве первого приближения привело к инварианту:

$$\frac{j_s h}{I} = \frac{8}{3\pi} \frac{1}{[(Y/h)^2 + 1]^3}. \quad (10)$$

который несколько отличается от найденного нами и экспериментально и теоретически. В частности, согласно (10)

$$\left. \frac{j_s h}{I} \right|_{Y/h \rightarrow 0} = 0,85. \quad (11)$$

Распределение тока по поверхности провода. Хотя распределение напряженности поля у провода при $h/r_0 \gg 1$ практически однородно,

$$E_{1r_0} = \frac{U}{h \ln \frac{2h}{r_0}} \left(\frac{h}{r_0} + \cos 2K\psi \right) \quad (12)$$

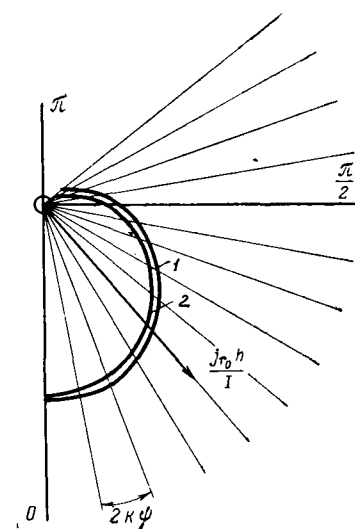


Рис. 5. Распределение тока по поверхности провода.
1 — пересчитано по формуле (16) исходя из измеренного распределения тока в плоскости земли; 2 — пересчитано по формуле (16) исходя из распределения тока в плоскости земли, подсчитанного по формуле (8).

распределение j_{r_0} не должно быть однородным. На силовых линиях, заканчивающихся на плоскости в области $Y/h \rightarrow \infty$, $j_s \rightarrow 0$. Поэтому на части поверхности провода, соответствующей $2K\psi \rightarrow \pi$, плотность тока должна приближаться к нулю. Можно сделать попытку определить распределение j_{r_0} в рамках допущения (6), из которого следует [Л. 5 и 8] постоянство вдоль силовой линии:

$$\frac{j}{E_1} = \frac{j_s}{E_{1s}} = \frac{j_{r_0}}{E_{r_0}}. \quad (13)$$

Если это так, то у поверхности провода следует ожидать распределения:

$$\frac{j_{r_0} h}{I} = \frac{j_s h}{I} \frac{E_{1r_0}}{E_{1s}}, \quad (14)$$

если все эти величины соответствуют одним и тем же силовым линиям ($2K\psi$). Подставив значение E_{1r_0} согласно (12) и учитывая, что

$$E_{1s} = \frac{2U}{h \ln \frac{2h}{r_0}} \frac{1}{1 + (Y/h)^2}, \quad (15)$$

после преобразований получим:

$$\frac{j_{r_0} h}{I} = \frac{j_s h}{I} \frac{h/r_0 + \cos 2K\psi}{1 + \cos 2K\psi}. \quad (16)$$

Как видим, при инвариантности $\frac{j_s h}{I}$ распределение приведенной плотности тока на поверхности провода $\left(\frac{j_{r_0} h}{I}\right)$ уже не является инвариантным ввиду зависимости от h/r_0 .

На рис. 5 экспериментальная кривая рис. 4 пересчитана согласно (16) на $\frac{j_{r_0} h}{I}$ при $h/r_0 = 100$. Как видим, плотность тока на поверхности провода распределена совсем неоднородно, что часто не учитывается в литературе.

Для максимальной плотности тока на образующей провода, обращенной к плоскости ($2K\psi = 0$) из (16) с учетом (9) следует:

$$\frac{j_{r_0} h}{I} = 0,75 \frac{1 + h/r_0}{2} \quad \text{при } h/r_0 \gg 1; \quad (17)$$

$$j_{r_0}|_{\max} = 2,35 \frac{I}{2\pi r_0}. \quad (18)$$

При равномерном распределении плотности тока по окружности провода, очевидно, имело бы место $j_{r_0} = \frac{I}{2\pi r_0}$. Экспериментальное исследование распределения j_{r_0} связано с рядом трудностей. Во всяком случае пока не удалось исследовать его с той же тщательностью, как и распределение j_s . Все же качественно характер распределения j_{r_0} рис. 5 получил в общих чертах подтверждение в экспериментах с расщепленным проводом.

На высоте $h = 1,5$ м был подвешен расщепленный провод, состоящий из 6 составляющих каждый диаметром 3,05 мм, расположенных по окружности

диаметром 30 мм.

Проводилось одновременное измерение тока с высокой стороны в каждой из составляющих и распределение плотности тока в плоскости земли. При неизменном, казалось бы, напряжении на проводе имели место значительные флуктуации тока в каждой из составляющих, превосходящие обычные флуктуации тока короны. Для представления распределения плотности тока по поверхности условного провода диаметром 30 мм было принято отнести ток каждой из составляющих провода к шестой части поверхности условного провода диаметром 30 мм.

На рис. 6 показано измеренное распределение (кривая 1) вместе с теоретической кривой распределения согласно (16), если $\frac{j_s h}{I}$ считать по (8) (кривая 3). Наконец, кривая 2 рис. 6 пересчитана согласно (16) по данным измерения распределения $\frac{j_s h}{I}$

в плоскости при коронировании расщепленного провода. При замене целого провода шестью составляющими трудно ожидать хорошего согласия рассматриваемых данных. Все же общий характер представленных кривых рис. 6 достаточно иллюстрирует неоднородность распределения плотности тока на поверхности провода и соотношения всех пересчитанных кривых.

Выводы. 1. В лабораторных условиях измерено распределение обобщенной плотности тока униполярной короны $\left(\frac{j_s h}{I}\right)$ на некоронирующем электроде

в схеме провод — плоскость, оказавшееся в хорошем согласии с теоретическим решением на основе θ -метода [Л. 8] как по закономерности распределения, так и инвариантности его в отношении интенсивности короны и геометрии электродов.

2. Показано, что аналогичное распределение плотности тока на коронирующем электроде не обладает такой же инвариантностью.

3. Показана неравномерность распределения плотности тока короны по поверхности коронирующего провода. При $h/r_0 \gg 1$ максимальная плотность тока в 2,35 раза выше средней плотности равномерного распределения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васяев В. И., Верещагин И. П. Метод расчета поля при коронном разряде. — «Электричество», 1971, № 5, с. 58—62.
2. Васяев В. И., Верещагин И. П. К расчету характеристик униполярного коронного разряда в системе электродов «ряд проводов между плоскостями». — «Электричество», 1972, № 5, с. 34—39.
3. Dupuy J., Berseille J., Housard M., Marsan J. Investigation Methods about D. C. Ionized Electric Fields. — «Tenth

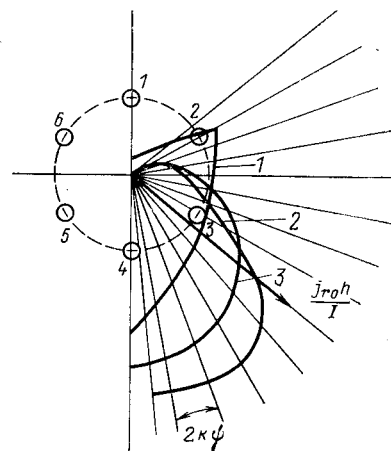


Рис. 6. Распределение плотности тока по поверхности расщепленного провода.

Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases», 1971, Oxford, England, pp. 164.

4. Sarma M. P., Janischewskyj W. Analysis Corona Losses on D. C. Transmission Lines. I — Unipolar Lines. — «IEEE Trans. Power App. and Systems», v. PAS — 88, May 1969, № 5, p. 718—725.

5. Попков В. И. К теории униполярной короны постоянного тока. — «Электричество», 1949, № 1, с. 33—48.

6. Усынин Г. П. Расчет поля и характеристик униполярного коронного разряда постоянного тока (провод-параллель-

ная плоскость). — «Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт», 1966, № 4, с. 56—70.

7. Попков В. И. О подвижности ионов в условиях коронного разряда. — «ДАН СССР», LVIII, 1947, № 6, с. 1043—1046.

8. Попков В. И. К теории коронного разряда в газе при постоянном напряжении. Общие характеристики униполярной короны и уравнение В-А зависимости при электродах провод — земля. — «Изв. АН СССР», ОТН, 1963, № 5, с. 664—674.

[1.7.1974]



УДК 621.3.015

Применение теории случайных функций к расчету статистических характеристик внутренних перенапряжений

Канд. техн. наук БЕЛЯКОВ Н. Н., инж. ЗИЛЕС Л. Д.

ВНИИЭ

Современный подход к проблеме координации изоляции в электрических сетях ВН и СВН должен учитывать статистические свойства внутренних перенапряжений. Большой интерес представляет, в частности, вероятность появлений перенапряжения заранее заданной величины при определенной коммутации в сети, а также зависимость ее от параметров схемы и характеристик коммутационных аппаратов. В настоящей статье предлагается метод расчета этой вероятности.

Как известно [Л. 1], переходный процесс в электрической сети определяется совокупностью случайных факторов, каждый из которых допускает количественное описание. Законы распределения этих случайных величин в дальнейшем считаются заданными.

Будем считать, что каждый переходный процесс отличен от нуля лишь на некотором конечном интервале времени. Бесконечная последовательность всех возможных в данных условиях процессов, образованная с учетом законов распределения упомянутых случайных факторов, является реализацией некоторой случайной функции. Другие реализации могут отличаться от описанной либо порядком следования процессов, либо положением точки начала отсчета времени и, следовательно, могут быть получены простым смещением уже имеющейся реализации по оси времени. Если любые положения точки отсчета времени равновероятны, то это приводит к стационарности рассматриваемой случайной функции [Л. 2].

Рассмотрим распределение ее мгновенных значений. Как известно, напряжение переходного процесса представляет собой сумму свободной и вынужденной составляющих. Соответственно последовательность переходных процессов можно рассматривать как наложение двух последовательностей: последовательность свободных составляющих и последовательность вынужденных составляющих. Эти последовательности можно, в свою очередь, рассматривать как самостоятельные случайные процессы. Назовем их первым и вторым процессами соответственно.

Одномерное распределение мгновенных значений первого процесса близко к нормальному [Л. 3].

Второй процесс представляет собой последовательность отрезков синусоиды с различными начальными фазами и амплитудами. Плотность распределения мгновенных значений такого процесса в случае постоянной амплитуды A и равномерного распределения фазы на интервале $(0, 2\pi)$ приведена в [Л. 4]:

$$W(y) = \begin{cases} \frac{1}{\pi A \sqrt{1 - (y/A)^2}} & \text{при } |y| \leq A; \\ 0 & \text{при } |y| > A. \end{cases}$$

Распределение суммы первого и второго случайных процессов может быть получено сверткой распределений слагаемых. Согласно [Л. 4]

$$W(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{u^2}{2\sigma^2}\right) \left[I_0\left(\frac{A^2}{4\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{|u|A}{\sigma^2}\right) + \right.$$

$$\left. + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n I_n\left(\frac{A^2}{4\sigma^2}\right) I_{2n}\left(\frac{|u|A}{\sigma^2}\right) \right] \exp\left(-\frac{A^2}{4\sigma^2}\right).$$

Здесь $I_k(z)$ — модифицированные функции Бесселя K -го порядка 1-го рода; σ — среднее квадратическое отклонение свободной составляющей.

Приведенная плотность распределения имеет два максимума при $|u| = A$ и минимум при $u = 0$.

Зная $W(u)$, легко получить распределение другого случайного процесса — абсолютной величины напряжения. Выражение плотности распределения $W(|u|)$ отличается от $W(u)$ лишь постоянным множителем. Нетрудно показать, что $W(|u|)$ является одновыпуклой гладкой функцией с интегрируемым квадратом.

Для случайных процессов с плотностью распределения, удовлетворяющей указанным условиям, получено следующее соотношение [Л. 5]:

$$N(h) = \frac{\sigma_{|u|'}}{2\pi\sigma_{|u|}} \exp\left(-\frac{h^2}{2}\right) \left\{ 1 + \frac{1}{6} \left[d_{30}h(h^2 - 3) + 3\left(\frac{h^2}{\pi}\right)^2 d_{21}(h^2 - 1) + 3d_{12}h \right] \right\}.$$

Здесь $N(h)$ — среднее число выбросов нормированного случайного процесса выше уровня h за единицу времени; $\sigma_{|u|'}$, $\sigma_{|u|}$ — средние квадратические отклонения мгновенных значений модуля напряжений $|u|$ и его производной $|u|'$;

$$h = \frac{H - m_{|u|}}{\sigma_{|u|}},$$

где H — уровень, достигаемый процессом $|u|$; $m_{|u|}$ — математическое ожидание мгновенных значений $|u|$.

Квазимоменты d_{30} , d_{21} , d_{12} выражаются в нашем случае следующим образом:

$$\begin{aligned} d_{30} &= \left\langle \frac{1}{\sigma_{|u|}^3} (|u| - m_{|u|})^3 \right\rangle; \\ d_{21} &= \left\langle \frac{1}{\sigma_{|u|}^2 \sigma_{|u|'}} (|u| - m_{|u|})^2 (|u|') \right\rangle; \\ d_{12} &= \left\langle \frac{1}{\sigma_{|u|} \sigma_{|u|'}^2} (|u| - m_{|u|}) (|u|')^2 \right\rangle. \end{aligned}$$

Символ $\langle \dots \rangle$ означает усреднение по ансамблю реализаций или по времени вследствие легко доказываемой эргодичности случайного процесса.

Каждый переходный процесс в сети является результатом действия какого-то возмущения, поэтому последовательность переходных процессов есть результат последовательности возмущений.

Каждое возмущение представляет собой импульс тока или напряжения, появляющийся на «входе» схемы (т. е. в точке,

где происходит коммутация). Последовательность таких возмущений представляет собой случайную функцию на входе схемы. Каждая ее реализация состоит из следующих друг за другом синусоидальных импульсов длительностью T_c . Время между началами двух последующих импульсов обозначим через T_n , причем $T_n > T_c$.

По соображениям, которые будут изложены ниже, следует считать знаки соседних импульсов противоположными. Это значит, что если n -й импульс (начало отсчета произвольно) имеет вид:

$$u_n(t) = U_n \sin[\omega(t - t_n) + \varphi_n],$$

то $(n+1)$ -й будет:

$$u_{n+1}(t) = U_{n+1} \sin[\omega(t - t_{n+1}) + \varphi_{n+1}].$$

Здесь U_n , t_n , φ_n — соответственно амплитуда, начальная точка (начало времени также произвольно) и фаза импульса; индекс указывает порядковый номер импульса, к которому относятся указанные величины.

Параметры разных импульсов статистически независимы. Импульсы должны быть разделены промежутками, достаточными для затухания переходных процессов, вызванных задним фронтом импульса.

Построенная описанным образом случайная функция на входе схемы является стационарной. Это следует из равной вероятности любого положения начала отсчета на оси времени.

Физически очевидной является и эргодичность рассматриваемой функции. Действительно, любая ее реализация по определению включает в себя все возможные импульсы и поэтому дает полное представление о функции в целом. Математическое ожидание входной функции тождественно равно нулю из-за чередования знаков импульсов.

Корреляционная функция, представляющая собой [Л. 2] среднее значение произведения двух сечений случайного процесса, сдвинутых на время τ , вычисляется по определению усреднением указанного произведения по ансамблю реализаций или, вследствие эргодичности, по времени.

Корреляционная функция не является полным описанием процесса. В частности, она не отражает наличия соседних импульсов, если они полностью независимы. Это обстоятельство и вынуждает ввести указанное выше чередование знаков импульсов.

Число возможных видов входных импульсов, используемых для расчета коммутационных перенапряжений, весьма ограничено, поскольку ограничено число возможных видов коммутаций. Поэтому возможно составление небольшой «библиотеки» корреляционных функций заранее. Описанные импульсы приведут к появлению переходных процессов в схеме и, в частности, в интересующей нас точке, которую мы будем называть выходом схемы.

Статистические характеристики последовательности переходных процессов на выходе схемы могут быть получены по соответствующим характеристикам входного процесса и параметрам схемы сети.

Если пренебречь нелинейными явлениями (насыщением магнитопроводов, короной и т. д.), то электрическую сеть можно отнести к классу так называемых линейных инерционных систем [Л. 6]. Процесс $u(t)$ на выходе такой системы можно выразить через процесс на входе $x(t)$ с помощью интеграла:

$$u(t) = \int_0^\infty x(t - \tau) h(\tau) d\tau,$$

где $h(\tau)$ — импульсная переходная функция. Она представляет собой реакцию системы на входное воздействие вида δ -функции и полностью характеризует линейную систему.

Аналогичное соотношение связывает математические ожидания процессов на входе и выходе линейной системы:

$$m_u(t) = \int_0^\infty m_x(t - \tau) h(\tau) d\tau.$$

Так как в нашем случае $m_x(t) = 0$, то получаем, что и $m_u(t) = 0$. Этот результат очевиден физически, так как процесс на выходе так же, как и на входе, состоит из импульсов, знаки которых чередуются.

Для линейных инерционных систем справедливо следующее соотношение между корреляционными функциями $B_x(\tau)$ и $B_u(\tau)$ на входе и выходе системы [Л. 6]:

$$B_u(\tau) = \int_0^\infty \int_0^\infty h(z) h(v) B_x(z - v + \tau) dv dz.$$

Для вычисления этого интеграла необходимо найти преобразования Лапласа функций $h(v)$ и $B_x(\tau)$ и затем несколько раз применить теорему о сдвиге оригинала и теорему Эфроса об изображении интеграла произведения двух оригиналов. После обратного перехода к оригиналу получается выражение для корреляционной функции на выходе линейной системы:

$$\begin{aligned} B_u(\tau) = & \sum_{p_h} \operatorname{res} \{ [B_{x1}(p) + B_{x1}'(-p)] h(p) h(-p) e^{p\tau} \} + \\ & + \sum_{p_{b1}} \operatorname{res} [h(p) h(-p) B_{x1}(p) e^{p\tau}] - \\ & - \sum_{p_h} \operatorname{res} [h(-p) h(p) B_{x2}(-p) e^{p(T-\tau)}] [1(\tau) - 1(\tau - T)] - \\ & - \sum_{p_h} \operatorname{res} [h(p) h(-p) B_{x2}(-p) e^{p(\tau+T)}] - \\ & - \sum_{p_h} \operatorname{res} [h(p) h(-p) B_{x2}(p) e^{p(\tau-T)}] [1(\tau - T)] - \\ & - \sum_{p_{b2}} \operatorname{res} [h(p) h(-p) B_{x2}(p) e^{p(\tau-T)}] [1(\tau - T)]. \end{aligned}$$

Здесь $h(p)$ — изображение импульсной переходной функции системы, вычисленной с учетом потерь; p_h — полюсы $h(p)$; $B_{x1}(p)$, $B_{x2}(p)$ — изображения частей корреляционной функции $B_x(\tau)$ на входе; p_{b1} и p_{b2} — полюсы соответственно $B_{x1}(p)$ и $B_{x2}(p)$.

Функция $B_x(\tau)$ описывается разными формулами на разных интервалах аргумента τ . Поэтому ее изображение Лапласа состоит из нескольких слагаемых. Формула $B_u(\tau)$ составлена для случая, когда

$$B_x(\tau) = \begin{cases} B_{x1}(\tau) & \text{при } 0 < \tau < T; \\ B_{x1}(\tau) - B_{x2}(\tau) & \text{при } \tau > T. \end{cases}$$

Отсюда следует:

$$B_x(p) = B_{x1}(p) - B_{x2}(p) e^{-pT}.$$

Если нужно, формула $B_u(\tau)$ может быть дополнена слагаемыми, содержащими $B_{x3}(p)$ с соответствующим сдвигом T_1 , и т. д. Структура этих слагаемых полностью аналогична членам, содержащим $B_{x2}(p)$.

Следует отметить, что, хотя функция $B_x(\tau) \neq 0$ при $\tau < 0$ изображение Лапласа $B_x(p)$ вычисляется обычное, одностроннее при $\tau > 0$. При этом не происходит никаких потерь информации из-за четности, присущей всем автокорреляционным функциям. Это свойство учтено при выводе формулы $B_u(\tau)$.

Запись $\operatorname{res}_{p_h} [F(p)]$ означает вычет функции $F(p)$ относительно полюса p_h , $1(X)$ — единичная ступень. Искомая дисперсия случайного процесса на выходе:

$$\sigma_u^2 = B_u(0),$$

дисперсия производной того же процесса

$$\sigma_u'^2 = -\frac{d^2}{d\tau^2} B_u(\tau) |_{\tau=0}.$$

Переход от дисперсии напряжения к дисперсии модуля напряжения производится по известным формулам [Л. 2]. Среднее значение модуля напряжения $m_{|u|}$ можно считать равным среднему значению модуля вынужденной составляющей напряжения на выходе схемы.

Для увеличения точности расчета числа выбросов необходимо перейти к случайной функции, реализации которой не содержат промежутков между импульсами. Дисперсии

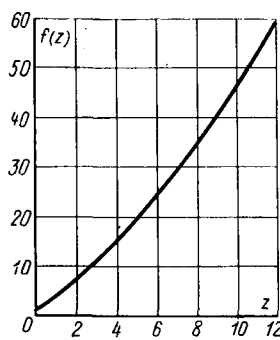


Рис. 1.

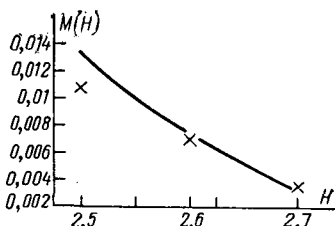


Рис. 2.

мгновенных значений и производной такой функции с достаточной точностью можно считать по формулам:

$$\sigma_{|u|}^2 = \frac{T_u}{T_c} D_{|u|}; \quad \sigma_{|u|'}^2 = \frac{T_{\pi}}{T_c} D_{|u|'}.$$

Квазимоменты в отличие от дисперсии вычисляются приближенно, так как они сравнительно мало влияют на число выбросов $N(h)$.

Величины d_{21} и d_{12} можно оценить, учитывая только первую гармонику свободной составляющей переходного процесса.

Такая оценка дает следующие результаты:

$$d_{21} \equiv 0, \\ d_{12} = \left\langle \frac{1}{\sigma_{|u|}^2 \sigma_{|u|'}^2} \left[-0,47 \frac{u_0^3}{\pi} + \frac{U_1^3 \omega_1^2}{3\delta\pi T_c} - \frac{1 + \cos 2\omega_1\pi}{4\omega_1^2 - 1} \frac{U_1^2 \omega_1^2}{2\delta\pi T_c} \right] \right\rangle,$$

здесь U_1 , ω_1 , δ — соответственно амплитуда, частота и декремент затухания свободной составляющей.

Операция усреднения проводится по случайной величине U_1 . Так как учитывается только 1-я гармоника свободной составляющей, то ее амплитуда U_1 может быть оценена по мгновенному значению вынужденной составляющей в момент коммутации и начальным условиям схемы.

Квазимомент d_{30} таким приемом определить не удастся. Поэтому рассмотрим величину:

$$x = \langle (|u| - m_{|u|})^3 \rangle = \langle |u|^3 \rangle - 3 \langle |u|^2 m_{|u|} \rangle + 3 \langle |u| m_{|u|}^2 \rangle - m_{|u|}^3 = \langle |u|^3 \rangle - 3\sigma_u^2 m_{|u|} + 2m_{|u|}^3.$$

Среднее значение $|u|^3$ может быть вычислено на основе известного закона распределения $W(|u|)$, приведенного выше. Соответствующие расчеты дают:

$$\frac{\langle |u|^3 \rangle}{\sigma^3} = f(z),$$

где $z = u_0^2/2\sigma^2$, σ^2 — дисперсия свободной составляющей переходного процесса.

Если свободная составляющая представляет собой экспоненциально затухающую синусоиду, то легко получить, что:

$$\sigma^2 = \left\langle \frac{u_1^2}{4\delta T_c} \right\rangle.$$

Здесь δ — декремент затухания свободной составляющей, который определяется при вычислении полюсов $h(p)$. Если свободная составляющая содержит несколько гармоник, то σ^2 можно определить только по одной гармонике, а именно по той, которая имеет наибольшую амплитуду. U_1 — амплитуда указанной гармоники. Как и при расчете d_{12} , можно считать, что U_1 зависит только от мгновенного значения вынужденной составляющей в момент коммутации и начальных условий схемы, по которым ее следует усреднить.

Кривая $f(z)$ приведена на рис. 1.

После определения $|u|^3$ вычисляется X , после этого — момент d_{30} .

Таким образом определены все параметры, входящие в формулу выбросов, а именно: средние квадратические отклонения модуля напряжения и его производной $\sigma_{|u|}$ и $\sigma_{|u|'}$, а также квазимоменты d_{21} , d_{12} , d_{30} .

Умножая $N(h)$ на длительность импульса входного случайного процесса, можно получить среднее число выбросов модуля напряжения за уровень h в течение одного переходного процесса.

Знание среднего числа выбросов случайного процесса позволяет определить вероятность высоких перенапряжений. Высокими считаются такие уровни, среднее число выбросов за которые в расчете на один переходный процесс меньше единицы. Это значит, что такие выбросы происходят не при каждой коммутации. Так как отдельные переходные процессы независимы, то рассматриваемые высокие выбросы также независимы. В таком случае число n выбросов за время T распределено по закону Пуассона:

$$p(h, n) = \frac{[N(h)T]^n}{n!} \exp[-N(h)T].$$

Если в качестве времени T взять длительность переходного процесса, то плотность вероятности появления одного перенапряжения уровня h при исследуемой коммутации будет равна:

$$p(h) = [N(h)T_c] \exp[-N(h)T_c].$$

Пример расчета выбросов. Рассмотрим напряжение в конце холостой линии при включении ее на шины системы. Фаза включения φ распределена равномерно, параметры системы в относительных единицах следующие:

$E = \sin(t + \varphi)$. Предвключенная индуктивность $L = 0,29$; активное сопротивление $r = 0,1$; волновое сопротивление $z_c = 1$; электрическая длина линии $\tau_\pi = \pi/6$.

Входной случайный процесс представляет собой последовательность импульсов э. д. с. Амплитуда импульсов равна 1, длина $T_c = 30$; $T_\pi = 2T_c = 60$. Начальная фаза распределена равномерно на интервале $(0, \pi)$. Изображения Лапласа частей корреляционной функции:

$$B_{x1}(p) = \frac{1}{2T_u} \left[T_c \frac{p}{p^2 + 1} - \frac{p^2 - 1}{(p^2 + 1)^2} \right],$$

$$B_{x2}(p) = \frac{1}{2T_u} \left[\frac{2p}{(p^2 + 1)^2} \sin T_c - \frac{p^2 - 1}{(p^2 + 1)^2} \cos T_c \right].$$

Остальные слагаемые входной корреляционной функции очень мало влияют на результат расчета по формуле $B_u(\tau)$, поэтому их влиянием можно пренебречь.

Полюсы $B_x(p)$ двукратные, $p_{1,2} = j$; $p_{3,4} = -j$.

Импульсная переходная функция системы будет равна:

$$h(p) = \frac{z_c}{(pL + r) \operatorname{sh} p\tau_\pi + z_c \operatorname{ch} p\tau_\pi}.$$

Полюсы передаточной функции: $p_{1,2} = -0,105 \pm j2,0$; $p_{3,4} = -0,034 \pm j6,9$; $p_{5,6} = -0,115 \pm j12,4$.

С учетом первых четырех полюсов $h(p)$

$$B_u(\tau) = \frac{1}{2T_u} \left\{ 57 \cos \tau - 1,3\tau \cos \tau + 1,3\tau \cos \tau \cdot 1 (\tau - T_c) + \right. \\ \left. + 1,16 \sin \tau + 1,16 \sin \tau \cdot 1 (\tau - T_c) + e^{-0,105\tau} (14,1 \cos 2\tau + \right. \\ \left. + 2,87 \sin 2\tau) + e^{-0,105\tau} [1 (\tau) - 1 (\tau - T_c)] (0,114 \cos 2\tau - \right. \\ \left. - 0,49 \sin 2\tau) + e^{-0,034\tau} (2,26 \cos 6,9\tau + 0,051 \sin 6,9\tau) - \right. \\ \left. - e^{-0,034\tau} [0,12 \sin 6,9 (T_c - \tau) - 0,0019 \cos 6,9 (T_c - \tau)] \times \right. \\ \left. \times [1 (\tau) - 1 (\tau - T_c)] \right\}.$$

Отсюда находим дисперсии: $\sigma_u^2 = 1,20$; $\sigma_{u'}^2 = 2,22$.

Математические ожидания и дисперсии модуля напряжения и его производной: $m_{|u|} = 0,88$, $\sigma_{|u|}^2 = 0,424$; $\sigma_{|u|'}^2 = 2,22$; $\sigma_{|u|} = 0,65$; $\sigma_{|u|'} = 1,49$.

Далее находим квазимоменты: $d_{30} = 6,8$; $d_{12} = -0,2$.

Формула числа выбросов на единицу времени (1 радиан промышленной частоты) имеет вид:

$$N(h) = \frac{1,49}{2\pi \cdot 0,65} \left\{ 1 + \right. \\ \left. + \frac{1}{6} [6,8h(h^2 - 3) - 1,8h] \right\} \exp\left(-\frac{h^2}{2}\right).$$

Здесь

$$h = \frac{H - m|u|}{\sigma|u|} = \frac{H - 0,88}{0,65}.$$

Зависимость $N(H)$ приведена на рис. 2.

Знаком «х» на рисунке отмечены точки, полученные для этих уровней экспериментально, путем расчетов серии переходных процессов в схеме на ЦВМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляков Н. Н. Применение теории случайных процессов для оценки параметров внутренних перенапряжений. — «Труды ВНИИЭ», вып. 34. М., «Энергия», 1969, с. 5—23.

2. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М., Физматгиз, 1969, 365 с.

3. Зилес Л. Д. О распределении свободных составляющих коммутационных перенапряжений в электрических сетях. — «Электричество», 1974, № 4, с. 16—19.

4. Левин Б. Р. Теория случайных процессов и ее применение в радиотехнике. М., «Советское радио», 1957, 495 с.

5. Тихонов В. И. Выбросы случайных процессов. М., «Мысль», 1970, 392 с.

6. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Ч. I. М., «Советское радио», 1966, 728 с.

[15.11.1973]



УДК 621.319.7.001.24

Расчет электростатического поля между иглой и плоскостью

Канд. техн. наук ВЕРЕЩАГИН И. П., инженеры ЗАРГАРЯН И. В., СЕМЕНОВ А. В.

Московский энергетический институт

В различных технических приложениях часто возникает необходимость в расчете электростатического поля заряженной иглы или поля в промежутке между иглой и плоскостью, например, задача о поле между лидером молнии и землей [Л. 1] при применении игольчатых электродов в электрофильтрах [Л. 2], при распылении жидкостей с капилляра в электрическом поле и т. д. Расчет электростатического поля входит как составная часть в метод расчета внешней области коронного разряда по Дейчу — Попкову [Л. 3].

Система электродов, поле которой рассчитывалось, представляла собой иглу, расположенную перпендикулярно плоскости (рис. 1). Игла состояла из цилиндрической части и конического наконечника. Конусный участок имел на конце закругление. Характерные размеры иглы и системы электродов в целом изменялись в широких пределах: $\alpha = 3 \div 27^\circ$; $L/H = 0,1 \div 10$; $d_{\text{ц}}/H = 0,1 \cdot 10^{-2} \div 0,4$; $r_3/H = 0,8 \cdot 10^{-4} \div 0,01$.

В силу сложной формы поверхности проводящей иглы и, как следствие, сложного вида записи граничных условий точное аналитическое решение задачи о распределении поля пока не представляется возможным. Среди приближенных методов наиболее перспективным является метод эквивалентных зарядов [Л. 4], когда неизвестное распределение плотности заряда по поверхности иглы заменяется конечным числом размещенных внутри электрода эквивалентных зарядов. Значения

этих зарядов, а иногда и их размещение определяются из условия равенства потенциалов точек, соответствующих поверхности электрода, приложенному напряжению.

Поскольку поле рассматриваемой системы электродов является осесимметричным, то эквивалентные заряды целесообразно располагать на оси иглы. Будем пока считать эти заряды точечными, хотя в дальнейшем используется аппроксимация и линейными зарядами.

Выражения для потенциалов системы точек, принадлежащих к поверхности иглы через эквивалентные заряды q_1, q_2, \dots, q_n записываются в виде:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1(x, y) &= Q_1(A_{11} - A'_{11}) + \dots \\ &\dots + Q_l(A_{1l} - A'_{1l}) + \dots + Q_n(A_{1n} - A'_{1n}); \\ \varphi_m(x, y) &= Q_1(A_{1m} - A'_{1m}) + \dots \\ &\dots + Q_l(A_{lm} - A'_{lm}) + \dots + Q_n(A_{nm} - A'_{nm}); \\ \varphi_k(x, y) &= Q_1(A_{1k} - A'_{1k}) + \dots \\ &\dots + Q_l(A_{lk} - A'_{lk}) + \dots + Q_n(A_{nk} - A'_{nk}), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $Q = \frac{q_l}{4\pi\epsilon_0}$; $1 \leq l \leq n$; $1 \leq m \leq k$; $A_{lm} = \frac{1}{r_{lm}}$; $A'_{lm} = \frac{1}{r'_{lm}}$ — соответственно расстояния от данной точки поверхности иглы m до заряда l и его зеркального отображения в плоскости.

В общем случае решением системы уравнений (1) при условии $\varphi_m = U$ (U — напряжение между иглой и плоскостью) определяются неизвестные: величины зарядов и координаты их расположения. Условие разрешимости системы (1) будет $k = 2n$, т. е. количество характерных точек на поверхности иглы должно быть равно удвоенному числу зарядов.

Практически целесообразно выбирать количество зарядов и их расположение из условия обеспе-

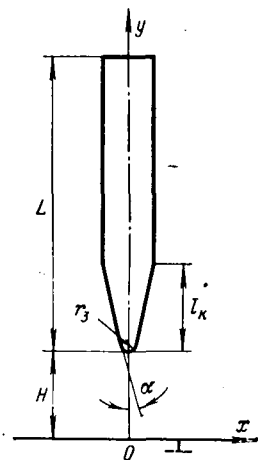


Рис. 1. Система электродов «игла — плоскость».

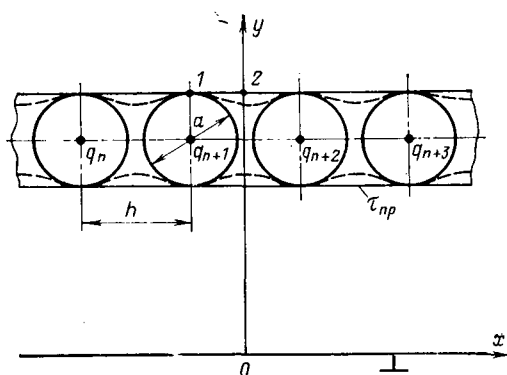


Рис. 2. Система электродов «провод, параллельный плоскости».

чения требуемой точности расчета, а решением системы (1) определять лишь значения зарядов. В этом случае система (1) превращается в систему линейных уравнений, методы решения которых наиболее просты.

Чтобы решить вопрос о необходимом количестве и расположении точечных зарядов, произведем расчет системы электродов «провод, параллельный плоскости». На рис. 2 показана замена провода точечными зарядами, расположенными на оси на расстоянии h друг от друга. При замене провода совокупностью точечных зарядов его поверхность уже не будет эквипотенциальной. На рис. 2 эквипотенциаль, соответствующая системе точечных зарядов, указана пунктиром. Максимальная погрешность расчета определяется отличием потенциала и напряженности поля в точках 1 и 2 от действительных.

На рис. 3 представлены рассчитанные в предположении одинаковых значений заряда на единицу длины провода и суммарного точечного заряда на той же длине функции $\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2\varphi_\tau}$ и $\frac{E_1 - E_\tau}{E_\tau}$, соответ-

ствующих погрешностям при определении потенциала и напряженности поля. Данные рис. 3 свидетельствуют, что ошибка в значениях величин напряженности поля существенно выше, чем в значениях потенциала (более, чем на порядок). Погрешность уменьшается по мере удаления от поверхности провода (кривые 3 и 4, рис. 3). Расстояние между точечными зарядами, равное диаметру провода ($a=2r$), следует рекомендовать при замене реальных электродов как наиболее целесообразное, так как при этом получается еще не слишком большое количество точечных зарядов (в пределах возможностей ЦВМ) и допустимая для технических расчетов погрешность (в потенциале — менее 1% и в напряженности — менее 5% за исключением

области на расстоянии, равном радиусу провода от его поверхности). Такая замена эквивалентна расположению зарядов в центрах вписанных соприкасающихся окружностей в общем случае электродов произвольной формы.

Указанная рекомендация о расположении точечных зарядов приводит к необходимости решения системы уравнений (1) на ЦВМ, поскольку число уравнений получается большим. Следует иметь в виду, что при значительном уменьшении расстояния между точечными зарядами возникают затруднения с решением системы уравнений (1) из-за того, что значения диагональных и остальных элементов матрицы становятся очень близкими друг к другу [Л. 6]. На это обстоятельство при расчете поля указано ранее в [Л. 5]. Поэтому нежелательно брать расстояния между точечными зарядами менее 0,5 радиуса электрода.

На минимальную величину расстояния между точечными зарядами в некоторой степени оказывает влияние выбор расположения точек поверхности электрода, для которых записывается совокупность уравнений (1). Целесообразно эти точки выбирать на пересечении нормали к поверхности электрода, опущенной из центров точечных зарядов, с этой поверхностью.

В табл. 1 приведены рассчитанные на ЦВМ распределения напряженности поля вдоль оси y для рассматриваемой системы электродов. Точечные заряды располагались в центрах соприкасающихся окружностей. Первый заряд помещался в центре

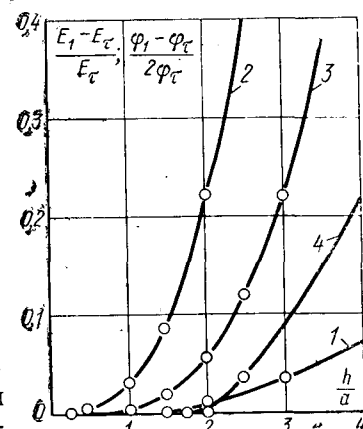


Рис. 3. Погрешности при аппроксимации провода точечными зарядами.

1 — при определении потенциала на поверхности провода; 2 — при определении напряженности на поверхности провода; 3 — при определении напряженности на расстоянии 1,5 a от оси провода; 4 — при определении напряженности на расстоянии 2 a от оси провода.

Таблица 1

Характерные размеры иглы и системы электродов		$\frac{E}{U} H$ для значений y/H :						
		1	0,999	0,996	0,96	0,8	0,4	0
$\alpha=27^\circ$; $r_3/H=0,128$; $d_{\text{ц}}/H=0,4$	$L/H=$ $\begin{cases} 0,8 \\ 1,2 \\ 2,0 \\ 10 \end{cases}$	6,20	6,15	—	3,85	1,25	0,410	0,301
		6,05	5,95	—	3,75	1,25	0,432	0,325
		5,85	5,80	—	3,65	1,25	0,450	0,350
		5,65	5,55	—	3,50	1,25	0,475	0,380
$\alpha=6^\circ$; $L/H=0,1$; $r_3/H=0,33 \cdot 10^{-3}$	$d_{\text{ц}}/H=$ $\begin{cases} 0,208 \cdot 10^{-2} \\ 0,416 \cdot 10^{-2} \\ 0,833 \cdot 10^{-2} \end{cases}$	166	—	23,9	2,016	0,192	0,0324	0,0207
		158	—	23,5	2,24	0,221	0,0377	0,024
		150	—	23,6	2,40	0,256	0,0444	0,0284
		—	—	—	—	—	—	—
$L/H=5$; $d_{\text{ц}}/H=0,4$; $r_3/H=0,4 \cdot 10^{-2}$	$\alpha=$ $\begin{cases} 6^\circ 20' \\ 9^\circ \\ 22^\circ \end{cases}$	93,5	62,5	—	3,025	0,680	0,295	0,250
		80,5	—	—	3,02	0,720	0,317	0,250
		58,5	40,5	—	3,20	0,850	0,385	0,315
		—	—	—	—	—	—	—
$L/H=0,1$; $d_{\text{ц}}/H=0,8 \cdot 10^{-2}$	$\alpha=5^\circ 13'$; $r_3/H=0,16 \cdot 10^{-3}$	2217	—	26,7	2,37	0,247	0,0425	0,0275
		—	—	—	—	—	—	—
		—	—	—	—	—	—	—
		—	—	—	—	—	—	—
$\alpha=6^\circ 20'$; $r_3/H=0,8 \cdot 10^{-4}$	$\alpha=6^\circ 20'$; $r_3/H=0,8 \cdot 10^{-4}$	3775	—	26,6	—	0,25	0,0426	0,0276
		—	—	—	—	—	—	—
		—	—	—	—	—	—	—
		—	—	—	—	—	—	—

Таблица 2

Характерные размеры иглы и системы электродов	$\frac{E}{U} H$ для значений y/H						
	1	0,995	0,98	0,6	0,4	0,2	0
$\alpha=27^\circ; L/H=5;$ $d_H/H=0,4;$ $r_3/H=0,01$	14,0 35,89	10,5 118,37	3,39 0,55 6,91	-3,0 0,3 0,567	-3,03 -0,33 0,422	-3,37 -0,33 0,362	-3,0 -0,28 0,345
$\alpha=27^\circ; L/H=0,1;$ $d_H/H=0,4 \cdot 10^{-2};$ $r_3/H=0,2 \cdot 10^{-2}$	15,0 2,0 1379	-1,5 -0,2 33,12	-2,74 -0,28 7,12	-2,77 0,0 0,09	-1,84 -0,16 0,049	-1,87 -0,14 0,035	-1,99 -0,16 0,031
$\alpha=22^\circ; L/H=0,5;$ $d_H/H=0,04;$ $r_3/H=0,1 \cdot 10^{-2}$	13,6 0,9 259	0,8 0,0 23,71	-1,47 -0,14 7,11	-2,3 -0,19 0,261	-2,1 -0,25 0,16	-2,11 0,0 0,123	-2,65 0,0 0,113

кривизны поверхности кончика иглы. Значения параметров были выбраны таким образом, что можно было проследить их влияние на распределение поля. В частности, варианты, представленные в первых четырех строках, отличаются значениями параметра L/H . Из сравнения распределений напряженности поля следует, что длина иглы слабо сказывается при $L/H > 1$. Напряженность поля у кончика иглы в основном определяется радиусом закругления кончика, а на напряженность поля у плоскости влияют диаметр иглы и угол конусности.

В табл. 2 приведены результаты расчета на ЦВМ при различных условиях аппроксимации иглы точечными зарядами, расположенными:

в центрах вписанных соприкасающихся окружностей (первая строка для каждого сочетания размеров иглы и системы электродов);

в центрах вписанных соприкасающихся окружностей плюс по одному точечному заряду между ними по всей длине иглы (вторая строка);

в центрах вписанных соприкасающихся окружностей плюс два точечных заряда между ними по всей длине иглы (третья строка).

Во всех случаях первый заряд помещался в центре кривизны кончика иглы. В табл. 2 указаны отклонения расчетных значений напряженностей (%) для первого и второго случаев по отношению к третьему, который рассматривался как наиболее близкий к действительному распределению. Это подтверждается тем, что расчетные значения напряженности для второго и третьего случаев различаются очень мало.

Аналогичные расчеты были выполнены для иглы в виде гиперboloида вращения. Для поля в промежутке «гиперboloид — плоскость» известно аналитическое выражение:

$$\frac{Eb}{U} = \frac{2}{\left[1 - \left(\frac{y}{b}\right)^2\right] \ln \frac{1 + \frac{c}{b}}{1 - \frac{c}{b}}},$$

где b — фокус гиперboloида; $y=c$ — координата кончика гиперboloида.

При расчетах на ЦВМ гиперboloид аппроксимировался точечными зарядами на длине, равной 20 в. Первый заряд помещался в центре кривизны поверхности кончика гиперboloида. Общее число точечных зарядов составляло 19.

Расчеты показали, что для гиперboloида размещение точечных зарядов в центрах вписанных соприкасающихся окружностей обеспечивает точность в пределах 3% по всему промежутку, кроме области на расстоянии, равном радиусу кривизны от кончика иглы. Таким образом, сравнивая аппроксимацию точечными зарядами провода, иглы с коническим кончиком и гиперboloида, можно сделать вывод, что наибольшие погрешности имеют место при замене провода. Этот случай и соответствующие значения погрешностей (рис. 3) позволяют судить о наибольших ошибках при численных расчетах с использованием точечных зарядов.

Размещение точечных зарядов в центрах соприкасающихся окружностей приводит к погрешности не более 5% по всему межэлектродному промежутку, за исключением области на расстоянии, равном радиусу кривизны от поверхности кончика электрода (вблизи поверхности она выше).

Хорошим способом повысить точность определения напряженности вблизи кончика иглы является увеличение вдвое количества точечных зарядов, размещаемых в начальной части иглы. В результате общее количество точечных зарядов возрастает в небольшой мере и не является препятствием для использования ЦВМ, а точность определения напряженности повышается. Так, для иглы с геометрическими параметрами, приведенными в табл. 2, были получены при увеличении числа точечных зарядов вдвое в начальной части иглы на расстоянии $(10 \div 30) r_3$ примерно такие же результаты, как и при увеличении числа зарядов по всей длине (второй случай, табл. 2).

В общем случае применение удвоенного числа точечных зарядов по сравнению с размещенными в центрах соприкасающихся вписанных окружностей обеспечивает точность расчета не хуже 0,5% в основной части промежутка и не более 2% вблизи кончика иглы.

Представляет интерес рассмотреть распределение эквивалентной плотности заряда по оси иглы. Плотность эквивалентного линейного заряда на каждом участке находилась как отношение величины точечного заряда к половине расстояния до

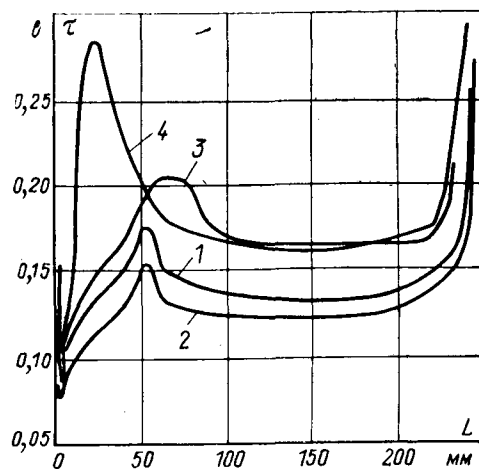


Рис. 4. Кривые распределения линейного заряда вдоль иглы. 1 — $L/H=5$; $\alpha=5^\circ 30'$; $d_H/H=0,2$; $r_3/H=0,4 \cdot 10^{-2}$; 2 — $L/H=0,1$; $\alpha=5^\circ 30'$; $d_H/H=0,4 \cdot 10^{-2}$; $r_3/H=0,8 \cdot 10^{-4}$; 3 — $L/H=5$; $\alpha=9^\circ$; $d_H/H=0,4$; $r_3/H=0,4 \cdot 10^{-2}$; 4 — $L/H=5$; $\alpha=22^\circ$; $d_H/H=0,4$; $r_3/H=0,4 \cdot 10^{-2}$.

соседних точечных зарядов. На рис. 4 представлены указанные распределения для четырех вариантов значений параметров, характеризующих систему электродов «игла с конической частью — плоскость». Во всех случаях имеет место близкое к линейному нарастание плотности заряда, которое соответствует конусной части, далее максимум плотности заряда при переходе от конической к цилиндрической части и, наконец, участок с примерно постоянной плотностью, соответствующий цилиндрической части иглы. В конце иглы снова происходит возрастание плотности заряда.

Относительно простая закономерность распределения плотности заряда открывает возможность разработки приближенного метода расчета, когда распределение заряда представляется как совокупность ограниченного числа линейных и точечных зарядов.

Для того чтобы не прибегать к помощи ЦВМ, необходимо ограничиться тремя-четырьмя неизвестными и соответственно решать систему трех-четырех уравнений.

Среди различных вариантов аппроксимации распределения плотности заряда по оси иглы был выбран как обеспечивающий наилучшее приближение к действительному распределению заряда следующий вариант. В пределах конической части предполагаются: точечный заряд q в центре кривизны поверхности кончика электрода и от этого центра до конца конической части линейный заряд, плотность которого изменяется в соответствии с формулой:

$$\tau_k = \alpha + \beta l,$$

где α, β — некоторые постоянные коэффициенты.

Цилиндрическая часть иглы аппроксимируется линейным зарядом с постоянной плотностью $\tau = a = \text{const}$ (рис. 5, а). Для определения четырех неизвестных должны быть записаны уравнения для потенциалов четырех характерных точек поверхности иглы. Эти уравнения имеют вид (обозначения указаны на рис. 5, а):

$$\begin{aligned} \varphi_m(x, y) = U = Q \left[\frac{1}{\sqrt{(H_k - y)^2 + x^2}} - \frac{1}{\sqrt{(H_k + y)^2 + x^2}} \right] + \tau_1 \left[\ln \frac{H_0 - y + \sqrt{(H_0 - y)^2 + x^2}}{H_k - y + \sqrt{(H_k - y)^2 + x^2}} - \ln \frac{H_0 + y + \sqrt{(H_0 + y)^2 + x^2}}{H_k + y + \sqrt{(H_k + y)^2 + x^2}} \right] + \\ + \tau \left[\ln \frac{H_a - y + \sqrt{(H_a - y)^2 + x^2}}{H_0 - y + \sqrt{(H_0 - y)^2 + x^2}} - \ln \frac{H_a + y + \sqrt{(H_a + y)^2 + x^2}}{H_0 + y + \sqrt{(H_0 + y)^2 + x^2}} \right] + \tau_2 \left[\sqrt{(H_0 - y)^2 + x^2} - \sqrt{(H_k - y)^2 + x^2} + (x - H_k) \times \right. \\ \left. \times \ln \frac{H_0 - y + \sqrt{(H_0 - y)^2 + x^2}}{H_k - y + \sqrt{(H_k - y)^2 + x^2}} - \sqrt{(H_0 + y)^2 + x^2} + \sqrt{(H_k + y)^2 + x^2} + (x + H_k) \times \right. \\ \left. \times \ln \frac{H_0 + y + \sqrt{(H_0 + y)^2 + x^2}}{H_k + y + \sqrt{(H_k + y)^2 + x^2}} \right], \end{aligned}$$

$$\text{где } Q = \frac{q}{4\pi\epsilon_0}; \quad \tau_1 = \frac{\alpha}{4\pi\epsilon_0}; \quad \tau_2 = \frac{\beta}{4\pi\epsilon_0}; \quad \tau = \frac{a}{4\pi\epsilon_0};$$

В результате расчетов при различных параметрах иглы были выбраны как обеспечивающие наилучшее совпадение с расчетами на ЦВМ следующие точки поверхности иглы, для которых записываются уравнения.

1. На кончике иглы, вблизи которого поле в основном определяется величиной заряда q .

2. В середине конической части, что позволяет в общем хорошо моделировать эту часть иглы.

3. На расстоянии $(5 \div 15) r_3$ от кончика иглы, где r_3 — радиус закругления кончика иглы. Причем, большие значения этого расстояния соответствуют малым углам конусности.

4. На расстоянии, равном $(1,5 \div 2)H$, если $L/H \geq 5$, или на расстоянии $(1/3 \div 1/2)L$ от кончика иглы, если $L/H < 5$. Выбор этой точки нормирования влияет на распределение поля в основной части промежутка. При изменении координат точки в указанных пределах результаты расчета изменяются мало.

Результаты расчета по приближенной методике с учетом рекомендаций по выбору точек нормирования с расчетами на ЦВМ показали, что различие не превышает 8—10% вблизи поверхности иглы и 5% по межэлектродному промежутку. Аналогичные результаты получены во всем диапазоне изменения параметров. Это дает основания утверждать, что рассматриваемая приближенная методика может быть использована для расчета поля игольчатых электродов.

Для расчета полей сложных систем электродов, какими являются, например, игольчатые электроды электрофильтров, желательно дальнейшее упрощение методики расчета. Действительно, электроды электрофильтров представляют собой ряд проводов с большим количеством игл между заземленными осадительными электродами, поэтому имея очень простую методику расчета элемента системы (иглы), можно рассчитать поле всей системы.

В таком простейшем варианте аппроксимации использованы точечный заряд q в центре кривизны поверхности кончика иглы и линейный заряд с постоянной плотностью $\tau = a = \text{const}$, который начинается на расстоянии s от точечного заряда и продолжается до конца иглы (рис. 5, б). Соответствующее

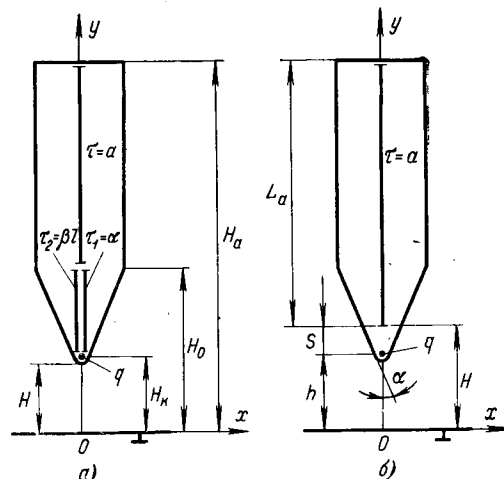


Рис. 5. Аппроксимации игольчатого электрода линейными и точечными зарядами.

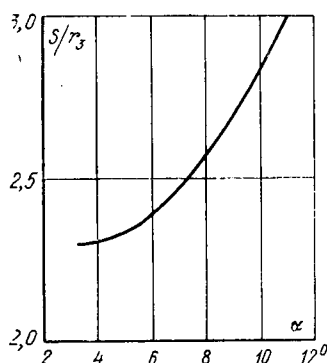


Рис. 6. Зависимость оптимального расстояния между точечным зарядом и началом линейного заряда от угла конусности игольчатого электрода.

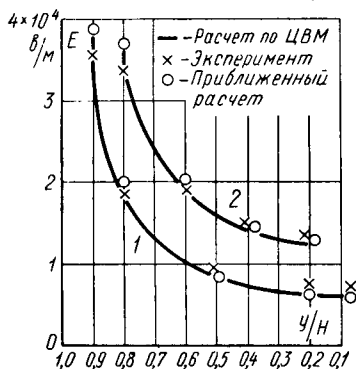


Рис. 7. Расчетные и экспериментальные распределения напряженности вдоль центральной силовой линии для системы электродов «игла-плоскость». 1 — $L/H=2,5$; $\alpha=5^\circ 30'$; $d_{\text{п}}/H=0,1$; $r_3/H=0,2 \cdot 10^{-2}$; $U=3$ кВ; 2 — $L/H=5$; $\alpha=5^\circ 30'$; $d_{\text{п}}/H=0,2$; $r_3/H=0,4 \cdot 10^{-2}$; $U=2,6$ кВ.

уравнение для потенциала точек поверхности иглы имеет вид:

$$\varphi_m(x, y) = U = Q \left[\frac{1}{\sqrt{(h-y)^2 + x^2}} - \frac{1}{\sqrt{(h+y)^2 + x^2}} \right] + \tau \left[\ln \frac{L_a + H - y + \sqrt{(L_a + H - y)^2 + x^2}}{H - y + \sqrt{(H - y)^2 + x^2}} - \ln \frac{L_a + H + y + \sqrt{(L_a + H + y)^2 + x^2}}{H + y + \sqrt{(H + y)^2 + x^2}} \right],$$

где $Q = \frac{q}{4\pi\epsilon_0}$; $\tau = \frac{a}{4\pi\epsilon_0}$.

В качестве точек нормирования выбраны кончик иглы и середина конической части. Если расположить вторую точку нормирования в конце конической или начале цилиндрической части, то получается плохое совпадение с расчетом на ЦВМ при больших углах конусности.

Установлена оптимальная величина расстояния s , которая зависит в основном от угла конусности α (рис. 6).

С учетом рекомендаций даже при такой простейшей аппроксимации погрешность расчета напряженности поля в основной части межэлектродного пространства не превышает 5—7% и только вблизи иглы достигает 10—12%.

Результаты расчета были сопоставлены с экспериментальными распределениями напряженности поля, полученными при измерениях с помощью пробного тела [Л. 7]. Пробное тело (металлический

шар диаметром 4 мм) подвешивался на тонкой диэлектрической нити диаметром 40 мкм. Высота подвеса составляла 85 см. Предварительно шар заряжался при прикосновении к пластине плоского конденсатора, включенного на постоянное напряжение. Величина заряда шара определялась по формуле [Л. 8]:

$$Q = \frac{2}{3} \pi^2 \epsilon_0 a^2 E_p,$$

где E_p — напряженность поля; a — радиус шара. Контрольные измерения заряда по отклонению в поле плоского конденсатора дали результат, совпадающий с формулой.

Заряженный шар на подвесе вводился в исследуемое поле, и по смещению его относительно вертикали Δy определялась напряженность поля:

$$E = \frac{P \Delta y}{Ql},$$

где P — вес шара; l — длина нити.

Изменения заряда шара за время измерений обнаружено не было. Оценки показали, что составляющей силы, обусловленной неравномерным распределением напряженности поля, можно было пренебречь.

На рис. 7 приведены распределения напряженности по центральной силовой линии между иглой и плоскостью для двух вариантов межэлектродного расстояния. Результаты расчетов на ЦВМ и по приближенной методике, используя аппроксимацию распределения плотности заряда по игле точечным и линейным зарядом, хорошо согласуются с экспериментальными результатами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Техника высоких напряжений. Под ред. Разевига. М., Госэнергоиздат, 1963.
2. Ужов В. Н. Очистка промышленных газов электрофильтрами. М., «Химия», 1967.
3. Попков В. И. К теории коронного разряда в газе при постоянном напряжении. — «Изв. АН СССР, ОТН», 1953, № 5.
4. Иоссель Ю. Я. и др. Расчет электрической емкости. М., «Энергия», 1969.
5. Abou-Seada M. S., Nasser E. Digital computer calculation of the electric potential of a rod gap. — «Proceedings of IEE», v. 56, 1968.
6. Демидович В. П., Марон И. А. Основы вычислительной математики. М., «Наука», 1966.
7. Бабашкин В. А., Верещагин И. П. Измерение напряженности поля коронного разряда методом пробного тела. — В сб.: Сильные электрические поля в технологических процессах. М., «Энергия», 1971, вып. 2.
8. Лебедев Н. Н., Скальская И. П. Сила, действующая на проводящий шарик, помещенный в поле плоского конденсатора. — «ЖТФ», 1962, вып. 3, т. 32.

[П.3.1974]



Расчет импульсного сопротивления протяженных заземлителей в плохо проводящих грунтах

Инж. АННЕНКОВ В. З.

Московский энергетический институт

Расчет импульсного сопротивления протяженных заземлителей в настоящее время производится при заданном напряжении [Л. 1], так как при решении нелинейных дифференциальных уравнений длиной линии в случае заданного тока невозможно определить постоянную интегрирования в уравнении для напряжения. Кроме того, существующий метод расчета не учитывает емкость заземлителя и поэтому пригоден для расчета импульсных сопротивлений протяженных заземлителей в грунтах с удельным сопротивлением не более $2 \cdot 10^3$ — $5 \cdot 10^3$ Ом·м в зависимости от расчетного момента времени и требуемой точности. Однако при $\rho = 10^4$ Ом·м емкостная проводимость может быть равна активной, и поэтому расчет без учета емкости приведет к недопустимой погрешности.

Импульсное сопротивление заземлителя, как известно, равно отношению потенциала в месте ввода тока к току:

$$z_i = \frac{\varphi_n}{i(0, t)}.$$

Как и ранее [Л. 2], ток в месте его ввода в заземлитель считаем заданным и для простоты линейно-нарастающим: $i = at$, где a — постоянная крутизна. Поэтому для определения импульсного сопротивления необходимо знать потенциал в месте ввода тока.

С целью учета искрообразования и емкости заземлителя при расчете импульсного сопротивления воспользуемся методом наведенного потенциала [Л. 3—5]. Рассмотрим случай ввода заданного тока в середину заземлителя (рис. 1, а). Сначала допустим, что заземлитель удален от поверхности земли (рис. 1, б). Потенциал в точке с координатами (0, y) при размещении начала координат в середине заземлителя и постоянном токе определяется выражением [Л. 3]:

$$\varphi_\infty = 2 \int_0^l \frac{I/l}{4\pi \frac{1}{\rho} \sqrt{x^2 + y^2}} dx, \quad (1)$$

где ρ — удельное сопротивление грунта; I/l — средний ток, стекающий с единицы длины заземлителя; $\sqrt{x^2 + y^2}$ — расстояние от точечного источника с координатами (x, 0) до точки, в которой определяется потенциал (рис. 1, б).

При стекании импульсного тока вместо среднего тока в формулу (1) необходимо подставить распределение тока, стекающего с протяженного заземлителя $i'(x, t)$ и, кроме того, учесть, что земля имеет и диэлектрическую проницаемость.

Распределение тока $i'(x, t)$ определяем из нелинейных дифференциальных уравнений длиной линии с проводимостью $g(u)$ и емкостью $C(u)$, зависящими от напряжения данной точки (рис. 2), пре-

небрегая продольным активным сопротивлением [Л. 1]:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial u}{\partial x} &= L \frac{\partial i}{\partial t}; \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= g(u)u + C(u) \frac{\partial u}{\partial t}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

В общем виде эта система решения не имеет, поэтому воспользуемся методом последовательных приближений.

Нулевое приближение. В качестве нулевого приближения при определении импульсного сопротивления z_0 принимаем, что искрообразование отсутствует. В этом случае система (2) упрощается до широко известной линейной системы уравнений длинной линии:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial u}{\partial x} &= L \frac{\partial i}{\partial t}; \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= gu + C \frac{\partial u}{\partial t}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Однако в отличие от имеющихся решений системы (3) в рассматриваемом случае необходимо получить распределение тока не при заданном напряжении, а при заданном токе. При линейно нарастающем токе с помощью операторного метода получаем распределение тока, стекающего с протяженного заземлителя:

$$i'(x, t) = \frac{a}{l} \left\{ t + \frac{4}{\pi^2} \delta^2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos k\pi \frac{x}{l}}{k^2} \left[1 - e^{-\delta t} \left(\cos \omega_k t + \frac{\delta^2 - \omega_k^2}{2\delta \omega_k} \sin \omega_k t \right) \right] \right\}, \quad (4)$$

где

$$\omega_k = \sqrt{\left(\frac{k\pi}{\tau} \right)^2 - \delta^2}$$

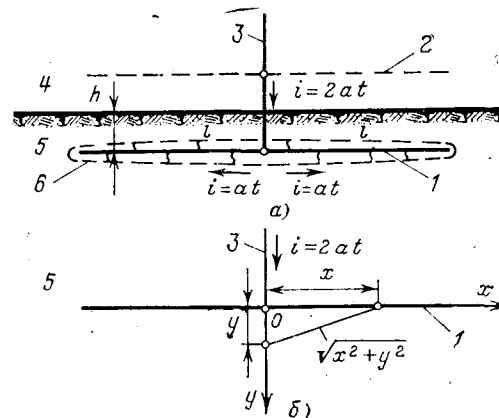


Рис. 1. Применение метода зеркальных изображений к расчету импульсного сопротивления протяженного заземлителя.

1 — заземлитель; 2 — его изображение; 3 — изолированный ввод тока; 4 — воздух — изолятор ($\epsilon = 0$, $\rho = \infty$); 5 — земля с параметрами ρ и ϵ_0 .

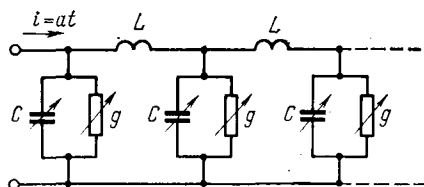


Рис. 2. Схема замещения протяженного заземлителя при стекании тока молнии.

— угловые частоты ряда Фурье, $k=1, 2, 3, \dots, \infty$;

$$\sigma = -\frac{g}{2C} = -\frac{1}{2\epsilon\epsilon_0\rho} \text{ — коэффициент искажения;}$$

$$\delta = \frac{g}{2C} = \frac{1}{2\epsilon\epsilon_0\rho} \text{ — коэффициент затухания;}$$

$\tau = l/v = l\sqrt{LC}$ — время пробега волной расстояния l .

Для того чтобы учесть емкостную проводимость при суммировании наведенных потенциалов от точечных источников с током $i'(x, t)$, в выражении (1) вместо проводимости $1/\rho$ подставим операторную проводимость с учетом диэлектрической проницаемости земли $(1/\rho + \epsilon\epsilon_0)$. Тогда из (1) получим операторный потенциал в месте ввода тока в заземлитель:

$$\begin{aligned} \varphi_\infty(p) &= 2 \int_0^l \frac{i'(x, p)}{4\pi(1/\rho + \epsilon\epsilon_0)\sqrt{x^2 + y^2}} dx = \\ &= \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \int_0^l \frac{i'(x, p) dx}{(p + 2\delta)\sqrt{x^2 + y^2}}. \end{aligned} \quad (5)$$

При этом к потенциалу от точечного источника, расположенного в месте ввода тока, прибавляются потенциалы от всех других точечных источников. Так как в (5) скорость распространения волн принимается бесконечной, то коэффициент использования точечных источников учитывается приближенно.

Из теоремы свертки операторного исчисления следует, что делению изображения некоторой функции, в данном случае $i'(x, p)$, на выражение $(p + 2\delta)$ соответствует умножение оригинала на $e^{-2\delta(t-\lambda)}$ и интегрирование произведения в пределах от нуля до t . Поэтому вместо (5) получим распределе-

ние потенциалов в середине заземлителя с учетом его емкости:

$$\varphi_\infty(x, t, y) = \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \int_0^l \int_0^t \frac{i'(t, \lambda) e^{-2\delta(t-\lambda)}}{\sqrt{x^2 + y^2}} d\lambda dx, \quad (6)$$

где λ — переменная интегрирования.

Подставляя в (6) распределение тока (4), получаем общее выражение потенциала заземлителя, расположенного на большом удалении от поверхности земли:

$$\begin{aligned} \varphi_\infty(x, t, y) &= \frac{ap}{4\pi\delta} \int_0^l \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} \left\{ 2\delta t - (1 - e^{-2\delta t}) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{8\delta^2\tau^2}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos k\pi \frac{x}{l}}{k^2} \left[1 - e^{-\delta t} \left(\cos \omega_k t + \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left. + \frac{\delta}{\omega_k} \sin \omega_k t \right) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (7)$$

Найти функцию, являющуюся суммой ряда Фурье в выражении (7), оказалось невозможным. Поэтому для преобразования (7) выделим частные случаи:

- 1) $|\sigma|\tau \leq 1,5$ или $\rho \geq \frac{l}{3v\epsilon\epsilon_0\rho}$, или $l \leq \frac{1}{2} l_{кр}$;
- 2) $|\sigma|\tau \leq \pi$ или $\rho \geq \frac{l}{2\pi v\epsilon\epsilon_0\rho}$, или $l \leq l_{кр}$ (и $l > \frac{1}{2} l_{кр}$);
- 3) $|\sigma|\tau > \pi$ или $\rho < \frac{l}{2\pi v\epsilon\epsilon_0\rho}$, или $l > l_{кр}$,

где $l_{кр} = 2\pi v\epsilon\epsilon_0\rho$ — критическая длина протяженного заземлителя [Л. 2].

Как видно из рис. 3, области 1—3 для указанных частных случаев охватывают всю площадь, каждая точка которой соответствует семейству подобных заземлителей, так как величины δt и $|\sigma|\tau$ являются критериями подобия без учета искрообразования [Л. 6]. Область 4, в которой $\delta t < 2|\sigma|\tau$ или $t < 2\tau$, исключается из рассмотрения, так как при этом условии расчетная длина

$$l_p = \frac{vt}{2} \text{ меньше длины } l.$$

Область 1 соответствует весьма плохо проводящим грунтам, 2 — плохо проводящим, а 3 — хорошо проводящим грунтам.

В области 1 выражение (7) упрощается путем пренебрежения коэффициентом искажения в формуле для угловых частот гармоник ω_k ряда Фурье, а импульсное сопротивление подсчитывается при кратных значениях времени $t = 2k\tau$, где k — целое число. Пользуясь методом зеркальных изображений, получаем распределение потенциалов φ_k по оси

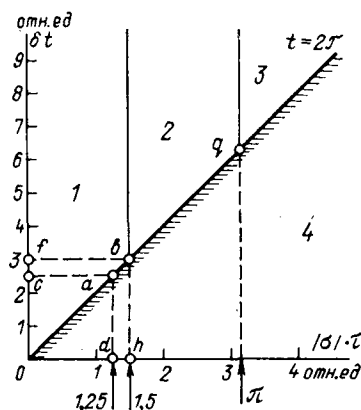


Рис. 3. Области применения расчетных формул.

y в глубь земли при вводе тока $i=2at$ в середину заземлителя, когда $(y+2h) \ll 3l/2$:

$$\varphi_h(y) = \frac{2at\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l}{V2hy} \times \left[1 - \frac{1-e^{-2\delta t}}{2\delta t} + \frac{2\delta\tau}{3t/\tau} (1-e^{-\delta t}) \left(1 - \frac{9}{4\ln \frac{2l}{V2hy}} \right) \right]. \quad (8)$$

Потенциал заземлителя φ_h равен потенциалу $\varphi_h(y)$ на расстоянии, равном $y=r_0$. Отсюда импульсное сопротивление без учета искрообразования при вводе тока в середину заземлителя

$$z_0 = \varphi_h/2at = R_0 \left[1 - \frac{1-e^{-2\delta t}}{2\delta t} + \frac{2\delta\tau}{3t/\tau} (1-e^{-\delta t}) \left(1 - \frac{9}{4\ln \frac{2l}{V2hr_0}} \right) \right], \quad (9)$$

где $R_0 = 1/gl$ — стационарное сопротивление.

Сравнение с подобной формулой, полученной в [Л. 2] из распределения напряжения по заземлителю как по длинной линии, показывает, что эти формулы отличаются лишь коэффициентом:

$$F_0 = 1 - \frac{9}{4\ln \frac{2l}{V2hr_0}}. \quad (10)$$

Коэффициент F_0 значительно меньше единицы при малых длинах, когда поле существенно отличается от цилиндрического; при больших l , когда может сказываться запаздывание волн от точечных источников, $F_0 \approx 0,75$.

Найденный коэффициент F_0 обусловлен уменьшением тока по длине заземлителя, т. е. уменьшением токов точечных источников. Физически это означает, что не весь ток молнии протекает по индуктивности $L_0 = Ll$. Об этом же свидетельствует и коэффициент $1/3$ члена Ll/t . Метод наведенного потенциала приближенно учитывает увеличение проводимости на единицу длины по сравнению с проводимостью g , которая определяется при постоянном токе. Учет коэффициента F_0 сближает результаты расчетов и опытов, описанных в [Л. 7].

В области 2 импульсное сопротивление получается из выражений (7) и (9) при $e^{-\delta t} = 0$. Из построения на рис. 3 видно, что если $|\sigma|\tau \gg 1,5$ (длина заземлителя в 2 раза меньше критической), то $\delta t \gg 3$ и, следовательно, $e^{-\delta t} \approx 0$. Поэтому формула (9) является общей для обеих областей.

Область 3 требует отдельного рассмотрения. Поэтому далее разбирается только область 1, соответствующая весьма плохо проводящим грунтам.

Учет искрообразования. В первом приближении за распределение тока при определении импульсного сопротивления с учетом искрообразования принимаем распределение нулевого приближения. Искрообразование учитываем тем, что потенциал в месте ввода тока определяем на расстоянии y , равном фиктивному радиусу искрообразования r_{ϕ} , а не r_0 , и, кроме того, вместо глубины h подстав-

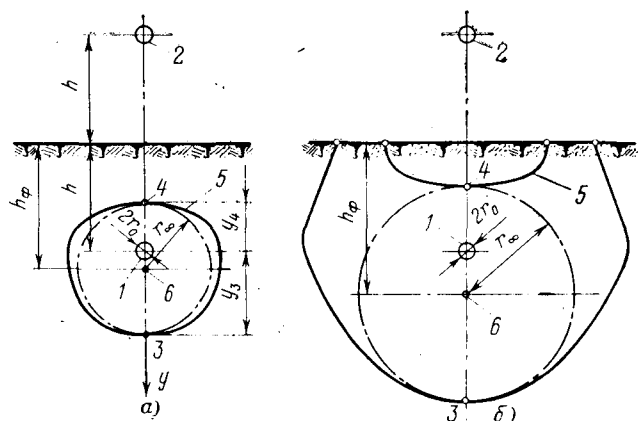


Рис. 4. Зоны искрообразования протяженного заземлителя в месте ввода тока.
 $a - r_{\phi I} = 0,5$ м; $b - r_{\phi I} = 0,8$ м.
1 — заземлитель; 2 — его изображение; 3, 4 — точки на границе зоны искрообразования; 5 — границы зоны искрообразования; 6 — центр искрообразования.

ляем фиктивную глубину центра зоны искрообразования (приложение I, рис. 4, а, б).

В переходном режиме значение фиктивного радиуса находим из условия:

$$-\frac{\partial \varphi_h}{\partial y} = E_{\text{пр}}, \quad (11)$$

где φ_h определяется выражением (8), так как искрообразование при заданном токе незначительно изменяет поле вне зоны искрообразования; $E_{\text{пр}}$ — пробивная напряженность грунта.

В первом из указанных выше частных случаев из (11), пренебрегая малыми членами, имеем:

$$r_{\phi I} \approx \frac{1}{2\pi l E_{\text{пр}}} \left[1 - \frac{1-e^{-2\delta t}}{2\delta t} + \frac{2\delta\tau}{3t/\tau} (1-e^{-\delta t}) \right]. \quad (12)$$

Стационарное значение фиктивного радиуса искрообразования ($t \rightarrow \infty$)

$$r_{\infty} = \frac{at\rho}{2\pi l E_{\text{пр}}}$$

является третьим критерием подобия [Л. 7] протяженных заземлителей, который может быть изображен на графике рис. 3 в виде третьей координатной оси прямоугольной системы координат.

Импульсное сопротивление протяженного заземлителя длиной $2l$ при вводе тока $i=2at$ в его середину получаем из (8), заменив y на $r_{\phi I}$, а h на h_{ϕ} , при $(r_{\phi I} + 2h_{\phi}) \ll 3l/2$:

$$z_{II} = R_{II} \left[1 - \frac{1-e^{-2\delta t}}{2\delta t} + \frac{2\delta\tau}{3t/\tau} (1-e^{-\delta t}) \left(1 - \frac{9}{4\ln \frac{2l}{V2h_{\phi} r_{\phi I}}} \right) \right], \quad (13)$$

где $R_{II} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l}{V2h_{\phi} r_{\phi I}}$ — стационарное сопротивление заземлителя при радиусе искрообразования, равном фиктивному.

Расчеты показывают, что, хотя формулы (9), (12) и (13) выведены для кратных значений $t =$

$=2k\tau$, они приближенно справедливы для любого времени t , так как колебания величины импульсного сопротивления проявляются в основном в виде излома зависимости импульсного сопротивления от времени [Л. 2].

При $\delta t \geq 3$ формула (13) упрощается, так как $e^{-\delta t} \leq 0,05$:

$$z_{II} = R_{II} \left[1 - \frac{1}{2\delta t} + \frac{2\delta\tau}{3t/\tau} \left(1 - \frac{9}{4 \ln \frac{2l}{\sqrt{2h\phi_{\Phi I}}}} \right) \right]. \quad (14)$$

Во втором из указанных частных случаев выражение (7) приводит так же к формуле (14). Поэтому формула (13) является общей для обеих областей (1) и (2).

При определении z_{II} относительное распределение тока, стекающего с заземлителя, было принято таким же, как и без учета искрообразования. Искрообразование приведет к тому, что токи единичных источников, расположенных вблизи ввода тока, возрастут в связи с большей проводимостью. Так как общий ток молнии задан, то токи единичных источников в конце заземлителя соответственно уменьшатся. В соответствии с формулой (6) приведенный потенциал возрастет, т. е. увеличение тока приводит к увеличению проводимости в меньшее число раз. Поэтому импульсное сопротивление z_{II} меньше истинного значения z_i .

Второе приближение заключается в том, что учитывается перераспределение тока по протяженному заземлителю вследствие неравномерного искрообразования по длине, а потенциал в месте ввода тока находится таким же образом, как и в первом приближении.

Для определения уточненного распределения тока, стекающего с заземлителя, используем второе нелинейное дифференциальное уравнение системы (2). Зависимость проводимости и емкости от напряжения $g(u)$ и $C(u)$, приведенные на рис. 5 для различных длин заземлителей, находим из стационарного режима (приложение II) и заменяем линейными:

$$g_u/g = C_u/C = 1 + mu. \quad (15)$$

Затем (15) подставляем во второе уравнение системы (2) и получаем нелинейное дифференциальное уравнение:

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = g(1 + mu)u + C(1 + mu)\frac{\partial u}{\partial t}. \quad (16)$$

Необходимо отметить, что оба граничных условия $x=0, i=at$ и $x=l, i=0$ заданы только для тока, и поэтому при интегрировании первого уравнения системы (2) нельзя найти постоянную интегрирования. Совместное решение двух уравнений системы (2) с учетом емкости оказалось невозможным.

При интегрировании (16) можно учесть лишь одно из двух указанных граничных условий. Для того чтобы учесть оба граничных условия, дифференцируем (16) по x :

$$-\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} [g(1 + mu)u + C(1 + mu)\frac{\partial u}{\partial t}]. \quad (17)$$

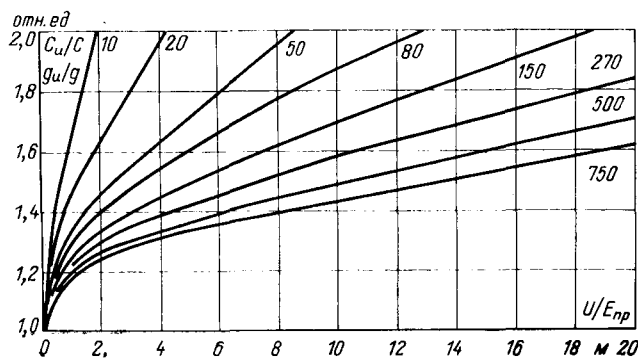


Рис. 5. Зависимости относительного увеличения импульсной проводимости и емкости от отношения напряжения к пробивной напряженности грунта. Цифры у кривых означают длину заземлителя в метрах.

Решаем это уравнение методом последовательных приближений. За исходное распределение напряжения принимаем распределение u_0 без учета искрообразования (приложение III). При этом из (17) получаем после двухкратного интегрирования и определения постоянных интегрирования новое распределение тока по протяженному заземлителю с учетом неравномерного по длине искрообразования ($\delta t \geq 3$):

$$|i'(x, t)|_{II} = \frac{a}{l} \left\{ t + Ll \left[2mat - maClR_0 + \frac{1}{R_0} + \frac{2}{3} ma \frac{Ll}{R_0} \right] \left(\frac{1}{3} - \frac{x}{l} + \frac{1}{2} \frac{x^2}{l^2} \right) - \frac{maL^2l^2}{R_0} \left(\frac{2}{15} - \frac{x^2}{l^2} + \frac{x^3}{l^3} - \frac{1}{4} \frac{x^4}{l^4} \right) \right\}. \quad (18)$$

Полученное выражение (18) используем в формуле (6) вместо выражения (4).

Применяя затем метод зеркального отображения, после преобразований получаем при вводе тока $i=2at$ в середину заземлителя импульсное сопротивление с учетом искрообразования во втором приближении ($\delta t \geq 3$):

$$z_{III} = \varphi_{hII}/2at = R_{III} \left[1 - \frac{1}{2\delta t} + \frac{2}{3} maLl \times \right. \\ \times \left(1 - \frac{9}{4 \ln \frac{2l}{\sqrt{2h\phi_{\Phi II}}}} \right) + \left(\frac{Ll}{3tR_0} - maL \frac{1}{2\delta t} \right) \times \\ \times \left(1 - \frac{9}{4 \ln \frac{2l}{\sqrt{2h\phi_{\Phi II}}}} \right) + \frac{4}{15} maL \frac{Ll}{3tR_0} \times \\ \left. \times \left(1 - \frac{195}{64 \ln \frac{2l}{\sqrt{2h\phi_{\Phi II}}}} \right) \right], \quad (19)$$

где

$$r_{\Phi II} \approx \frac{at\rho}{2\pi l E_{пр}} \left[1 - \frac{1 + maLl}{2\delta t} + \frac{2}{3} maLl + \frac{Ll}{3tR_0} \left(1 + \frac{4}{15} maLl \right) \right] \quad (20)$$

— фиктивный радиус искрообразования;

Данные для расчета		Импульсные сопротивления			
		$z_{II}, \text{ом}$	$z_{III}, \text{ом}$	$z_I, \text{ом}$	$\frac{z_{II}-z_I}{z_I} \cdot 100\%$
$\rho=0,5 \cdot 10^3 \text{ ом} \cdot \text{м}$	1 мксек	25,2	34	29,6	15
$\rho=12,5 \cdot 10^3 \text{ ом} \cdot \text{м}$	4 мксек	88,3	102,5	95,4	7,5
	7 мксек	74	86	80	7,5

$$h_{\Phi} = \sqrt{h^2 + r_{\Phi II}^2}$$

— фиктивная глубина центра зоны искрообразования заземлителя; $m = \frac{g_u/g - 1}{\varphi_{hI}}$ — постоянная величина, причем потенциал φ_{hI} определен в первом приближении: $\varphi_{hI} = iz_{II} = 2atz_{II}$.

Импульсное сопротивление при вводе тока в конец заземлителя с учетом искрообразования можно приближенно определить, умножив (13) или (19) на $2\eta_i$, где

$$\eta_i = \frac{\ln[l/\sqrt{2h\varphi_{\Phi}}]}{\ln[2l/\sqrt{2h\varphi_{\Phi}}]}$$

— импульсный коэффициент использования, который приближенно определяется из стационарного режима при фиктивных размерах заземлителя. Тогда в (13) и (19) изменяется лишь величина R_i .

Точность определения импульсного сопротивления с учетом искрообразования как в первом, так и во втором приближении зависит от интересующего нас момента времени. При очень большом значении t получаем установившийся режим, при котором $z_{II} = z_{III} = R_i = \frac{1}{g_u}$, т. е. импульсные сопротивления, определенные с учетом искрообразования в первом и втором приближениях, равны импульсному сопротивлению без учета индуктивности и емкости. При очень малом времени величины z_{II} и z_{III} также равны одному и тому же значению импульсного сопротивления сосредоточенного заземлителя с учетом его емкости, так как волны не успевают распространиться по заземлителю, а роль индуктивности при малых временах мала [Л. 2].

В отличие от z_{II} импульсное сопротивление z_{III} определено с учетом увеличения тока в начальной части и его уменьшения в конце заземлителя вследствие большего искрообразования в месте ввода тока.

Новое распределение тока (18) было получено по напряжению u_0 , которое больше истинного. Кроме того, коэффициент m найден по заниженному потенциалу φ_{hI} первого приближения. Поэтому новое распределение тока $|i'(x, t)|_{II}$ в соответствии с формулой (6) дает потенциал и импульсное сопротивление z_{III} , которые больше истинных.

Так как z_{II} меньше истинного, а z_{III} , наоборот, больше, то для надежности результата истинное сопротивление найдено как среднеарифметическое обоих значений $z_i = \frac{z_{II} + z_{III}}{2}$.

Ниже сравниваются значения z_{II} , z_{III} и z_i , подсчитанные для бесконечных заземлителей при $I_m = 50 \text{ кА}$, $E_{пр} = 10 \text{ кВ/см}$, различных значениях времени t и вводе тока в начало заземлителя.

Как видно из таблицы, в плохо проводящих грунтах ($\rho \geq 0,5 \cdot 10^3 \text{ ом} \cdot \text{м}$) даже при определении импульсного сопротивления бесконечных заземлителей величина z_{II} не более, чем на 15% меньше истинного значения z_i . Кроме того, в связи с приближенным учетом изменения параметров g , L и C при продвижении волн по заземлителю, его импульсное сопротивление завышено, так как оно определяется с использованием уравнений длинной линии. Поэтому для расчетов импульсного сопротивления целесообразнее использовать более простую формулу первого приближения (13). Эта формула, как указывалось, справедлива, если расчетная длина заземлителя не превышает критическую, значения которой для различных удельных сопротивлений грунта даны ниже:

$\rho, \text{ ом} \cdot \text{м}$	$1 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	$12,5 \cdot 10^3$	$20 \cdot 10^3$
$l_{кр}, \text{ м}$	55	100	220	550	1000

Сравнение расчетных и опытных значений импульсных сопротивлений по данным различных авторов показывает, что величина z_{II} больше опытных значений (приложение IV).

Таким образом, перераспределение тока по заземлителю, возникающее при увеличении тока молнии из-за неравномерного искрообразования по длине, незначительно сказывается на величине импульсного сопротивления протяженного заземлителя.

Приложение 1. Фиктивный радиус и фиктивная глубина центра зоны искрообразования заземлителя. Когда радиус искрообразования r_{Φ} соизмерим с глубиной заложения заземлителя h , наведенные потенциалы над заземлителем под ним различны. Рассмотрим, каким образом изменится зона искрообразования в этом случае на примере стационарного режима. Потенциал в точке 3 (рис. 4,а) в соответствии с методом наведенного потенциала при токе $i = 2at$ равен:

$$\varphi_3 = \frac{at\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{y_3} + \ln \frac{2l}{2h+y_3} \right). \quad (21)$$

Расстояние искрообразования y_3 определяем, приравняв производную потенциала φ_3 по y с обратным знаком пробивной напряженности грунта $E_{пр}$. При этом напряженности складываются как векторы: в точке y_4 , например, они вычитаются. После преобразований оказывается, что зона искрообразования смещается и фиктивная глубина центра зоны искрообразования равна

$$h_{\Phi} = \sqrt{h^2 + r_{\Phi}^2}, \quad (22)$$

где фиктивный радиус искрообразования

$$r_{\Phi} = \frac{y_3 + y_4}{2} = \frac{at\rho}{2\pi l E_{пр}} = r_{\infty} \quad (23)$$

остается неизменным и равным радиусу искрообразования при расположении заземлителя на очень большой глубине. Полностью эта зона построена путем геометрического сложения напряженностей

и показана на рис. 4,а как эквиградиентная поверхность при $E_{np}=10$ кВ/см и токе $I_m=50$ кА. Из рис. 4,а видно, что по горизонтали искрообразование интенсивнее, чем по вертикали и поэтому в действительности зона искрообразования не является окружностью.

Однако до токов примерно 50 кА, даже в грунтах весьма высокого сопротивления, этим можно пренебречь. При токах более 50 кА центр искрообразования в весьма плохо проводящих грунтах приближается к поверхности земли, а зона искрообразования существенно искажается (рис. 4,б). Это имеет место при $r_{\Phi} > h/\sqrt{3}$, и в этом случае целесообразно заземлитель рассматривать расположенным на поверхности земли, что дает более точные результаты.

Приложение II. Зависимость проводимости и емкости заземлителя от напряжения в стационарном режиме. Импульсная проводимость $g(u)$ с учетом искрообразования при вводе тока $i=2at$ в заземлитель длиной $2l$ равна:

$$g_u = \frac{\pi}{\ln \frac{2l}{\sqrt{2h\Phi r_{\Phi}}}}$$

Отношение импульсной проводимости к проводимости без учета искрообразования:

$$\frac{g_u}{g} = \frac{\ln \frac{2l}{\sqrt{2hr_0}}}{\ln \frac{2l}{\sqrt{2h\Phi r_{\Phi}}}}, \quad (24)$$

где стационарное значение фиктивного радиуса искрообразования

$$r_{\Phi} = \frac{2at\rho}{2\pi 2lE_{np}} = \frac{at\rho}{2\pi lE_{np}} = r_{\infty}. \quad (25)$$

Подставляя в (24) и (25) вместо тока, стекающего с единицы длины заземлителя $\frac{2at}{2l}$ произведение напряжения на заземлителе на импульсную проводимость ug_u , получаем, что отношение g_u/g не является функцией удельного сопротивления земли:

$$\frac{g_u}{g} = \frac{\ln [2l/\sqrt{2hr_0}]}{\ln \frac{2l}{\sqrt{\frac{u}{E_{np}} \frac{g_u}{g} \sqrt{h^2 + \left(\frac{u/E_{np} g_u/g}{2 \ln [2l/\sqrt{2hr_0}]}\right)^2}}}}. \quad (26)$$

Трансцендентное уравнение (26) можно решить относительно g_u/g методом последовательных приближений. Однако удобнее, задаваясь током и определяя фиктивные размеры заземлителя из выражений (25) и (22), найти увеличение проводимости по (24). Подсчитанные таким образом зависимости относительной импульсной проводимости от отношения u/E_{np} даны на рис. 5 для различных длин заземлителей. При подсчете было принято, что глубина $h=0,8$ м, однако эти зависимости приближенно справедливы и для других h , так как в области практически применяемых глубин (0,5–1 м) величина g_u/g мало зависит от глубины заложения заземлителя.

Относительная импульсная емкость C_u/C равна найденной относительной импульсной проводимости g_u/g .

Приложение III. Распределение напряжения по протяженному заземлителю без учета искрообразования получаем из уравнений длинных линий с постоянными параметрами g , L , C и r при заданном в начале заземлителя токе $i=at$:

$$u(x, t) = a \left\{ \sqrt{\frac{r}{g}} \frac{\operatorname{ch} \sqrt{rg}(l-x)}{\operatorname{sh} \sqrt{rg}l} - \frac{C}{g^2 l} \left(1 - e^{-\frac{g}{C}t} \right) + \right. \\ \left. + 2 \frac{v^2}{l} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos k\pi \frac{x}{l}}{\delta^2 + \omega_k^2} \left[L \left(1 - e^{-\delta t} \left(\cos \omega_k t + \right. \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + \frac{\delta}{\omega_k} \sin \omega_k t \right) \right) - \frac{2r\delta}{\delta^2 + \omega_k^2} \left(1 - e^{-\delta t} \left(\cos \omega_k t + \right. \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + \frac{\delta^2 - \omega_k^2}{2\delta\omega_k} \sin \omega_k t \right) \right) \right] \right\}. \quad (27)$$

Пренебрегая в (27) продольным активным сопротивлением r , получаем после преобразований и упрощения при $\delta t \geq 3$ и $l \leq l_{кр}$ ($\rho \geq \frac{l}{2\pi\omega\epsilon_0}$), то же, как это было сделано в [Л. 2]:

$$u(x, t) = u_0 = a \left[R_0 t - C l R_0^2 + L l \left(\frac{1}{3} - \frac{x}{l} + \frac{1}{2} \frac{x^2}{l^2} \right) \right].$$

Приложение IV. Пример 1. Влияние емкости заземлителя. Испытания заземлителей в плохо проводящих грунтах, когда сказывается емкость заземлителя и проявляется искрообразование в грунте, описаны в [Л. 9]. Рассмотрим испытания заземлителя длиной 40 м, радиусом $r_0=1,4$ мм, при токе 306 А. Измеренное значение $R_0=232$ Ом. Отсюда $\rho=4180$ Ом·м. По [Л. 7] $\delta=1,9 \cdot 10^6$ сек⁻¹.

Из формулы (12), подставляя $\tau=l\sqrt{LC}$, $\delta=\frac{g}{2C}$, $\frac{1}{gl}=R_0$ и принимая $t=0,5$ мксек, $E_{np}=10$ кВ/см, получаем фиктивный радиус искрообразования:

$$r_{\Phi l} = \frac{at\rho}{2\pi lE_{np}} \left[1 - \frac{1 - e^{-2\delta t}}{2\delta t} + \frac{Ll}{3lR_0} (1 - e^{-\delta t}) \right] = \\ = \frac{306 \cdot 4180}{2\pi \cdot 40 \cdot 10^6} \left[1 - \frac{1 - e^{-2 \cdot 1,9 \cdot 0,5}}{2 \cdot 1,9 \cdot 0,5} + \right. \\ \left. + \frac{2 \cdot 40}{3 \cdot 0,5 \cdot 232} (1 - e^{-1,9 \cdot 0,5}) \right] = 0,0035 \text{ м.}$$

Из выражения (13) при той же подстановке имеем импульсное сопротивление:

$$z_{il} = \frac{\rho}{\pi l} \ln \frac{l}{\sqrt{2h\Phi r_{\Phi l}}} \left[1 - \frac{1 - e^{-2\delta t}}{2\delta t} + \frac{Ll}{3lR_0} (1 - e^{-\delta t}) \right] \times \\ \times \left(1 - \frac{9}{4 \ln \frac{2l}{\sqrt{2h\Phi r_{\Phi l}}}} \right) = \frac{4180}{\pi \cdot 40} \ln \frac{40}{\sqrt{2 \cdot 0,5 \cdot 0,0035}} \times \\ \times \left[1 - \frac{1 - e^{-2 \cdot 1,9 \cdot 0,5}}{2 \cdot 1,9 \cdot 0,5} + \frac{2 \cdot 40}{3 \cdot 0,5 \cdot 232} (1 - e^{-1,9 \cdot 0,5}) \right] \times$$

$$\times \left(1 - \frac{9}{4 \ln \frac{2.40}{\sqrt{2 \cdot 0,5 \cdot 0,0035}}} \right) = 217 (1 - 0,447 + 0,096) = 141 \text{ ом},$$

что примерно соответствует полученному в опыте значению $z_{\text{оп}} = 131 \text{ ом}$.

Из приведенного расчета ясно, что в опытах [Л. 9] импульсное сопротивление уменьшалось по сравнению с R_0 в основном вследствие влияния емкости заземлителя, а не из-за искрообразования.

Пример 2. Влияние искрообразования. Все приведенные к настоящему времени испытания протяженных заземлителей при больших токах выполнены, к сожалению, только в грунтах такого удельного сопротивления, при котором емкостью заземлителей можно пренебречь ($\delta t \geq 10$). К таким испытаниям можно отнести и опыты [Л. 10]. Рассмотрим результаты испытаний заземлителя длиной $l = 110 \text{ м}$, $r_0 = 3 \text{ мм}$, при $\rho = 1380 \text{ ом} \cdot \text{м}$ и токе $3,6 \text{ ка}$ с фронтом $\tau_{\text{ф}} = 10 \text{ мксек}$. Результаты расчетов по формулам (12), (13) для значений $t \leq \tau_{\text{ф}}$ даны ниже.

$t, \text{ мксек}$	3	5	10
Расчет $z_{\text{ил}}, \text{ ом}$	47	40	34
Опыт $z_{\text{оп}}, \text{ ом}$	41	33	26
Расхождение $\frac{z_{\text{ил}} - z_{\text{оп}}}{z_{\text{ил}}} 100\%$	+13%	+17%	+24%

Необходимо отметить, что при $t = \tau_{\text{ф}} = 10 \text{ мксек}$ и малом токе ($0,45 \text{ ка}$) расхождение составило 14%, причем измеренное значение $z_{\text{оп}} < R_0$. Это

явление, по-видимому, объясняется зависимостью удельного сопротивления грунта от времени воздействия импульса, которое во время опытов [Л. 7] было, однако, мало и поэтому при расчетах не учитывалось.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рябкова Е. Я. Импульсные характеристики заземлителей. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук 1955, 16 с. (МЭИ).
2. Анненков В. З. Расчет импульсного сопротивления противовесов. — «Электричество», 1970, № 2, с. 19—23.
3. How E. T. B. Capacity of radio — telegraph antennae. — «The Electrician», 1914, v. 73, p. 829.
4. Ослон А. Б. Заземляющие устройства на линиях электропередачи и подстанциях высокого напряжения. Итоги науки и техники. Серия «Электротехника и энергетика», 1964, ВИНТИ АН СССР. М., 1966, с. 65—184.
5. Sunde E. D. Earth conduction effects in transmission systems. New York, 1949, 1968, 373 p.
6. Веников В. А. Применение теории подобия и физического моделирования в электротехнике. Госэнергоиздат, 1949, 168 с.
7. Рябкова Е. Я., Анненков В. З. Исследование противовесов в плохо проводящих грунтах. — «Электричество», 1971, № 6, с. 71—75.
8. Корсунцев А. В. О применении физического моделирования к исследованию импульсных характеристик протяженных заземлителей. Доклад на Четвертой межвузовской конференции по применению физического моделирования в различных областях техники, сб. 4. М., МЭИ, 1962, с. 105—112.
9. Воробьев В. И., Балыгин И. Е. Экспериментальное определение волновых сопротивлений заземлений. Всесоюзная электротехническая Ассоциация. Госэнергоиздат, 1934, доклад № 18.
10. Berger K. Le comportement des prises de terre sous courants de choc de grande intensité. CIGRE, 1946, rap. N215.

[27.7.1973]

УДК 621.316.1.015.4.001.24

Анализ феррорезонансных процессов в трехфазных сетях с изолированной нейтралью при пофазной симметрии элементов колебательных контуров

Инж. ШАРГОРОДСКИЙ В. Л.

Всесоюзный заочный политехнический институт

Одной из недостаточно изученных областей являются феррорезонансные процессы в трехфазных электрических сетях с изолированной нейтралью.

Несмотря на то, что их обнаружили много десятков лет тому назад и их появление в электрических сетях с трансформаторами напряжения в качестве нелинейных элементов дезориентировало эксплуатацию и в ряде случаев было опасным для нормальной работы сети, такие феррорезонансные явления имеют место и в настоящее время, меняя свои качественные и количественные характеристики в зависимости от параметров поставляемых промышленностью трансформаторов напряжения.

Относящаяся к этим процессам специальная терминология, как-то: «смещение нейтрали», «нестабильность нейтрали», «колебания нейтрали», «ложная земля», — характеризует лишь внешние их проявления, а осциллографические исследования в действующих сетях решали, как и следовало предполагать, только частные задачи и не могли привести к обобщающим выводам.

Большинство публикаций, посвященных этому вопросу, носило в основном описательный характер применительно к результатам либо полевых наблюдений или экспериментов, либо к лабораторным исследованиям. Это не было случайным, так как существенная нелинейность цепей не позволяла при отсутствии современной вычислительной техники проверить последствия неизбежных при проведении математического анализа допущений и оценить

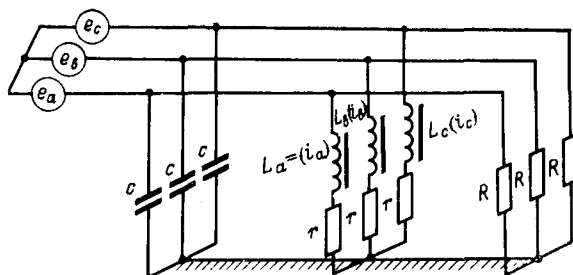


Рис. 1. Схема исследуемой цепи.

роль отдельных элементов процесса и параметров исследуемой цепи. В настоящее время имеются все технические средства для сопоставления аналитических, численных и экспериментальных результатов.

Рассмотрим некоторые особенности феррорезонансных процессов, возникающих в схеме, приведенной на рис. 1. Соответствующие дифференциальные уравнения могут быть представлены в виде системы:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_a}{dt} &= \frac{d\psi_0}{dt} - \frac{1}{3} r (2i_{aL} - i_{bL} - i_{cL}) + e_a; \\ \frac{d\psi_b}{dt} &= \frac{d\psi_a}{dt} + r (i_{aL} - i_{bL}) - e_{ab}; \\ \frac{d\psi_c}{dt} &= \frac{d\psi_a}{dt} + r (i_{aL} - i_{cL}) + e_{ca}; \\ \frac{d^2\psi_0}{dt^2} &= -\frac{1}{Rc} \frac{d\psi_0}{dt} - \frac{r}{3} \left[\frac{di_{aL}(\psi_a)}{dt} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{di_{bL}(\psi_b)}{dt} + \frac{di_{cL}(\psi_c)}{dt} \right] - \frac{1}{3c} \left(1 + \frac{r}{R} \right) \times \\ &\quad \times [i_{aL}(\psi_a) + i_{bL}(\psi_b) + i_{cL}(\psi_c)], \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\text{где} \quad \frac{d\psi_0}{dt} = \frac{1}{3} \left(\frac{d\psi_a}{dt} + \frac{d\psi_b}{dt} + \frac{d\psi_c}{dt} \right);$$

ψ_a, ψ_b, ψ_c — мгновенные значения полных потоко- сцеплений, связанных соответственно с нелинейны- ми индуктивностями фаз a, b и c ; $i_{aL}(\psi_a), i_{bL}(\psi_b), i_{cL}(\psi_c)$ — мгновенные значения токов в тех же эле- ментах.

Система (1) позволяет перейти к форме, зави- сящей при определенных условиях только от одной неизвестной — потоко- сцепления нулевой последова- тельности ψ_0 , что удобно при аналитическом иссле- довании. Одним из таких условий может быть ра- венство нулю последовательного сопротивления r . При этом, если источник энергии представлен си- стемой э. д. с. прямой последовательности с ампли- тудой E_a и частотой ω , потоко- сцепления, опреде- ляемые первыми тремя уравнениями системы (1), можно будет записать в виде:

$$\begin{aligned} \psi_a &= P_a(t) + \psi_0; \\ \psi_b &= P_b(t) + \psi_0; \\ \psi_c &= P_c(t) + \psi_0, \end{aligned}$$

где

$$P_a(t) = -\frac{E_a}{\omega} [\cos(\omega t + \varphi) - \cos \varphi];$$

$$P_b(t) = -\frac{E_a}{\omega} [\cos(\omega t + \varphi - 120) - \cos(\varphi - 120)];$$

$$P_c(t) = -\frac{E_a}{\omega} [\cos(\omega t + \varphi - 240) - \cos(\varphi - 240)].$$

Пусть $i_L = \alpha \psi + \beta \psi^3$, т. е.

$$i_{aL} = \alpha [P_a(t) + \psi_0] + \beta [P_a(t) + \psi_0]^3;$$

$$i_{bL} = \alpha [P_b(t) + \psi_0] + \beta [P_b(t) + \psi_0]^3;$$

$$i_{cL} = \alpha [P_c(t) + \psi_0] + \beta [P_c(t) + \psi_0]^3.$$

Применив разложение в ряд Тейлора, предста- вим i_L в виде полиномов, расположенных по сте- пеням ψ_0 :

$$i_{aL} = a_0(t) + a_1(t) \psi_0 + a_2(t) \psi_0^2 + a_3(t) \psi_0^3;$$

$$i_{bL} = b_0(t) + b_1(t) \psi_0 + b_2(t) \psi_0^2 + b_3(t) \psi_0^3;$$

$$i_{cL} = c_0(t) + c_1(t) \psi_0 + c_2(t) \psi_0^2 + c_3(t) \psi_0^3.$$

Здесь:

$$a_0(t) = \alpha P_a(t) + \beta P_a^3(t); \quad a_1(t) = \alpha + 3\beta P_a^2(t);$$

$$a_2(t) = \frac{1}{2!} [6\beta P_a(t)]; \quad a_3(t) = \frac{1}{3!} (6\beta);$$

$b_i(t)$ и $c_i(t)$ имеют вид, аналогичный $a_i(t)$.

При этом система (1) сводится к уравнению

$$\frac{d^2\psi_0}{dt^2} + \frac{1}{Rc} \frac{d\psi_0}{dt} + \frac{1}{3c} [A_0(t) + A_1(t) \psi_0 + A_2(t) \psi_0^2 + A_3(t) \psi_0^3] = 0, \quad (2)$$

где

$$A_i(t) = a_i(t) + b_i(t) + c_i(t), \quad i=0, 1, 2, 3.$$

В развернутом виде для $A_i(t)$ имеем:

$$\left. \begin{aligned} A_0(t) &= \frac{3}{4} \beta \frac{E_a^3}{\omega^3} \left[\cos 3\varphi - \cos(\omega t + 3\varphi) + \right. \\ &\quad \left. + \cos(2\omega t + 3\varphi) - \frac{1}{3} \cos(3\omega t + 3\varphi) \right]; \\ A_1(t) &= 3 \left[\alpha + 3\beta \frac{E_a^2}{\omega^2} (1 - \cos \omega t) \right]; \\ A_2(t) &= 0; \quad A_3(t) = 3\beta. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Проанализируем характер решений уравнения (2). В нем вид коэффициента $A_1(t)$ предопределяет возможность параметрического возбуждения коле- баний. Действительно, давая ψ_0 в (2) весьма малое приращение $\Delta\psi_0$ и пренебрегая вследствие их отно- сительной малости членами с $\Delta\psi_0^2$ и $\Delta\psi_0^3$, получим после соответствующих преобразований уравнение Матье в следующей форме:

$$\frac{d^2\eta}{dt^2} + \left\{ \left[\frac{\alpha}{c} + 3 \frac{\beta}{c} \left(\frac{E_a^2}{\omega^2} + \psi_0^2 \right) - \frac{1}{4} \frac{1}{R^2 c^2} \right] - \right. \\ \left. - 3 \frac{\beta}{c} \frac{E_a^2}{\omega^2} \cos \omega t \right\} \eta = 0, \quad (4)$$

где новая переменная η оп- ределяется выражением:

$\Delta\psi_0 = \eta e^{-\frac{t}{2RC}}$. В частном случае цепи без потерь ($R=\infty$) $\eta = \Delta\psi_0$.

Свойства решений урав- нения Матье и проведенный анализ (рис. 2) позволяют сделать некоторые предва- рительные выводы:

а) при определенных сочетаниях параметров бу- дут возникать чередую- щиеся зоны устойчивых и неустойчивых состояний с дискретным рядом частот в их основании [Л. 1];

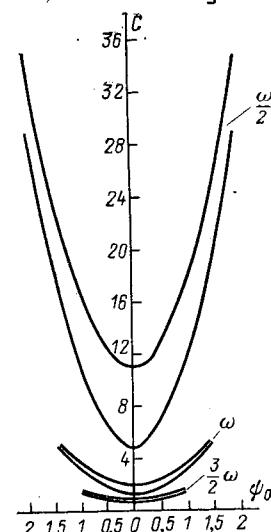


Рис. 2. Зоны неустойчи- вых решений уравнения Матье ($E_a=1$; $\omega=1$; $\alpha=$ $=\beta=0,5$; $R=\infty$).

б) в основании первой зоны неустойчивости лежит частота $\omega_0 = \omega/2$, которая и является наименьшей возможной частотой периодических решений уравнения (2);

в) в цепи рис. 1, как следствие а) и б), возможно «мягкое» возбуждение феррорезонансных колебаний, т. е. параметрическое развитие колебаний при сколь угодно малых, но конечных начальных значениях ψ_0 и $d\psi_0/dt$.

Такие же выводы можно получить при представлении токов в индуктивности симметричными и одинаковыми для всех трех фаз полиномами пятой степени вида $i_L = \alpha\psi + \gamma\psi^5$. Преобразования системы (1), проводившиеся с целью определения зон устойчивости (неустойчивости) периодических решений, привели в этом случае к уравнению Хилла:

$$\begin{aligned} \frac{d^2\eta}{dt^2} + \frac{1}{3c} \left[\left(3\alpha + 33,75\gamma \frac{E_a^4}{\omega^4} + 15\gamma\psi_0 \frac{E_a^3}{\omega^3} \cos 3\varphi + \right. \right. \\ \left. \left. + 90\gamma \frac{E_a^2}{\omega^2} \psi_0^2 + 5\gamma\psi_0^4 - \frac{3}{4} \frac{1}{R^2 c} \right) - 45\gamma \frac{E_a^2}{\omega^2} \left(\frac{E_a^2}{\omega^2} + \right. \right. \\ \left. \left. + 2\psi_0 \right) \cos \omega t + \left(11,25\gamma \frac{E_a^4}{\omega^4} + 45\gamma \frac{E_a^3}{\omega^3} \psi_0 \cos 3\varphi \right) \times \right. \\ \left. \times \cos 2\omega t - \left(45\gamma \frac{E_a^3}{\omega^3} \psi_0 \sin 3\varphi \right) \sin 2\omega t - \right. \\ \left. - \left(15\gamma \frac{E_a^3}{\omega^3} \psi_0 \cos 3\varphi \right) \cos 3\omega t + \left(15\gamma \frac{E_a^3}{\omega^3} \psi_0 \sin 3\varphi \right) \times \right. \\ \left. \times \sin 3\omega t \right] \eta = 0, \end{aligned}$$

где по-прежнему $\Delta\psi_0 = \eta e^{-\frac{t}{2Rc}}$.

Здесь также возможно параметрическое возбуждение колебаний с низшей частотой, близкой к $\omega/2$.

Возвратимся к анализу решений уравнения (2). Соответствующее ему уравнение Матвея, позволяя судить о тенденции развития процесса в рассматриваемой цепи, не дает сведений о самих процессах. Поэтому найдем приближенное аналитическое решение уравнения (2) методом вариации параметров. Применив к уравнениям (2) и (3) обычную для упомянутого метода систему преобразований в предположении, что $\psi_0 = x_0(t) \sin \omega_0 t + y_0(t) \cos \omega_0 t$ и $x_0(t)$, $y_0(t)$ — медленно меняющиеся составляющие амплитуды колебаний, а $\omega_0 = \omega/3$, $\omega/2$, ω , 2ω , 3ω — основная частота колебательного контура, кратная частоте источника энергии, получим для общего случая систем дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_0(t)}{dt} &= Ay_0(t) + B[y_0^3(t) + x_0^2(t)y_0(t)] + \\ &+ \Delta Ay_0(t) + Cx_0(t) + D_1; \\ \frac{dy_0(t)}{dt} &= -Ax_0(t) - B[x_0^3(t) + x_0(t)y_0^2(t)] + \\ &+ \Delta Ax_0(t) + Cy_0(t) + D_2. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Систему (5) можно представить соответствующим ей одним уравнением вида:

$$\frac{dx_0(t)}{dy_0(t)} = \frac{Ay_0(t) + B[y_0^3(t) + x_0^2(t)y_0(t)] + \Delta Ay_0(t) + Cx_0(t) + D_1}{-Ax_0(t) - B[x_0^3(t) + x_0(t)y_0^2(t)] + \Delta Ax_0(t) + Cy_0(t) + D_2}$$

$$\rightarrow \frac{+Cx_0(t) + D_1}{+ \Delta Ax_0(t) + Cy_0(t) + D_2}. \quad (6)$$

Здесь:

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{\omega_0}{2} - \frac{\alpha}{2\omega_0 c} - \frac{3}{2} \frac{\beta}{\omega_0 c} \frac{E_a^2}{\omega^2}; \\ B &= -\frac{3}{8} \frac{\beta}{\omega_0 c}; \\ C &= -\frac{1}{2Rc}; \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

остальные коэффициенты могут быть найдены из табл. 1.

Явления, описываемые уравнениями (5) или (6), весьма многообразны. В то же время характер этих явлений предопределяется ограниченным количеством особых точек уравнения (6) в плоскости $x_0(t)$, $y_0(t)$, а потому исследование последних и является первоочередным этапом дальнейшего анализа.

Особые точки уравнения (6) соответствуют установившимся режимам для уравнений (5), т. е. случаям, когда

$$\frac{dx_0(t)}{dt} = \frac{dy_0(t)}{dt} = 0.$$

Приняв это во внимание, а также используя (7) и данные табл. 1, найдем специфические особенности установившихся режимов для всех упомянутых выше значений ω_0 .

1. $\omega_0 = \omega/3$. Количество и координаты особых точек определим из уравнений (5), которые в этом случае примут вид:

$$\left. \begin{aligned} Ay_0 + B(y_0^3 + x_0^2 y_0) + Cx_0 &= 0; \\ -Ax_0 - B(x_0^3 + x_0 y_0^2) + Cy_0 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Для консервативной цепи ($R = \infty$) очевидными корнями системы (8) и особыми точками уравнения (6) будут $x_0 = y_0 = 0$. Кроме того, существует множество действительных решений, удовлетворяющих условию, когда подкоренное выражение в уравнении

$x_0 = \sqrt{-\frac{A}{B} - y_0^2}$ имеет положительное значение.

Геометрическим местом точек для этих решений в координатах x_0 , y_0 должна быть окружность радиуса $\rho = \sqrt{-A/B}$. Это также и амплитуда потокосцепления субгармонического процесса. Сам про-

Таблица 1

Коэффициенты к уравнениям системы (5)

ω_0	$\frac{\omega}{3}$	$\frac{\omega}{2}$	ω	2ω	3ω
ΔA	0	$\frac{3}{2} \frac{\beta}{\omega c} \frac{E_a^2}{\omega^2}$	0	0	0
D_1	0	0	$\frac{3}{8} \frac{\beta}{\omega c} \frac{E_a^3}{\omega^3} \cos 3\varphi$	$-\frac{3}{16} \frac{E_a^3}{\omega^4} \cos 3\varphi$	$\frac{1}{24} \frac{E_a^3}{\omega^4} \cos 3\varphi$
D_2	0	0	$\frac{3}{8} \frac{\beta}{\omega c} \frac{E_a^3}{\omega^3} \sin 3\varphi$	$-\frac{3}{16} \frac{E_a^3}{\omega^4} \sin 3\varphi$	$\frac{1}{24} \frac{E_a^3}{\omega^4} \sin 3\varphi$

цесс может существовать в определенной области значений емкости, когда $A > 0$ (так как всегда $B < 0$). Минимальная величина емкости, при превышении которой составляющие амплитуды субгармонического процесса действительны и отличны от нуля, может быть найдена из условия $A = 0$:

$$c_{\min} = \frac{\alpha}{\omega_0^2} + 3 \frac{\beta}{\omega_0^2} \frac{E_a^2}{\omega^2}. \quad (9)$$

Для диссипативной цепи ($R \neq \infty$) у системы (8) сохранится корень $x_0 = y_0 = 0$. Докажем, что в рассматриваемом случае это решение является единственным. Перепишем систему (8), отнеся x_0 к коэффициентам:

$$\left. \begin{aligned} f(x_0, y_0) &= By_0^3 + (A + Bx_0^2)y_0 + Cx_0 = 0; \\ g(x_0, y_0) &= (-Bx_0)y_0^2 + Cy_0 + (-Ax_0 - Bx_0^3) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Для (10) составим результат $R(f, g)$:

$$R(f, g) = \begin{vmatrix} B & 0 & A + Bx_0^2 & Cx_0 & 0 \\ 0 & B & 0 & A + Bx_0^2 & Cx_0 \\ -Bx_0 & C & -Ax_0 - Bx_0^2 & 0 & 0 \\ 0 & -Bx_0 & C & -Ax_0 - Bx_0^3 & 0 \\ 0 & 0 & -Bx_0 & C & -Ax_0 - Bx_0^3 \end{vmatrix}$$

и, приравняв нулю, найдем его корни.

После ряда преобразований, получим:

$$R(f, g) = -\frac{B}{4R^2c^2} \left(\frac{1}{4R^2c^2} + A^2 \right) x_0.$$

Таким образом, единственным корнем результата будет $x_0 = 0$. После этого можно найти все общие корни многочленов $f(0, y_0)$ и $g(0, y_0)$, т. е. из (10) имеем:

$$\begin{aligned} By_0^3 + Ay_0 &= 0; \\ -\frac{1}{Rc} y_0 &= 0. \end{aligned}$$

Единственным общим корнем здесь будет $y_0 = 0$.

Итак, система (10) никаких других общих решений, кроме $x_0 = y_0 = 0$, иметь не может.

Определим типы найденных особых точек. Для (5) уравнения в вариациях примут вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d(\delta x_0)}{dt} &= \left(2Bx_0y_0 - \frac{1}{2Rc} \right) \delta x_0 + (A + Bx_0^2 + 3By_0^2) \delta y_0 + \varphi_1; \\ \frac{d(\delta y_0)}{dt} &= (-A - 3Bx_0^2 - By_0^2) \delta x_0 + \left(-2Bx_0y_0 - \frac{1}{2Rc} \right) \delta y_0 + \varphi_2, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где δx_0 и δy_0 — весьма малые приращения в окрестности особых точек с координатами x_0, y_0 .

Вводя соответствующие обозначения и опуская в (11) нелинейные члены φ_1 и φ_2 , получим:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d(\delta x_0)}{dt} &= a_{11}\delta x_0 + a_{12}\delta y_0; \\ \frac{d(\delta y_0)}{dt} &= a_{21}\delta x_0 + a_{22}\delta y_0. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Общее решение этой системы уравнений можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \delta x_0 &= A_1 e^{\lambda_1 t} + A_2 e^{\lambda_2 t}; \\ \delta y_0 &= B_1 e^{\lambda_1 t} + B_2 e^{\lambda_2 t}. \end{aligned}$$

Здесь

$$\lambda_{1,2} = \frac{a_{11} + a_{22} \pm \sqrt{(a_{11} - a_{22})^2 + 4a_{12}a_{21}}}{2}. \quad (13)$$

Для особой точки с координатами $x_0 = y_0 = 0$ имеем:

$$a_{11} = a_{22} = -\frac{1}{2Rc}; \quad a_{12} = A; \quad a_{21} = -A.$$

Подставив эти значения в (13), получим:

$$\lambda_{1,2} = -\frac{1}{2Rc} \pm jA.$$

Таким образом, для консервативной цепи рассматриваемая особая точка будет особой точкой типа «центр», для диссипативной цепи — точкой типа «фокус». Последний устойчив, так как

$$a_{11} + a_{22} = -\frac{1}{2Rc} < 0.$$

2. $\omega_0 = \omega/2$. Уравнения (5) в этом случае примут вид:

$$\left. \begin{aligned} (A + \Delta A)y_0 + B(y_0^3 + x_0^2 y_0) + Cx_0 &= 0; \\ (-A + \Delta A)x_0 - B(x_0^3 + x_0 y_0^2) + Cy_0 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Для консервативной цепи корни системы (14) и особые точки уравнения (6) в плоскости $x_0(t), y_0(t)$ имеют вид:

$$x_0 = 0, y_0 = 0; \quad (15)$$

$$x_0 = 0, y_0 = \pm \sqrt{-\frac{A + \Delta A}{B}}; \quad (16)$$

$$x_0 = \pm \sqrt{-\frac{A - \Delta A}{B}}, y_0 = 0. \quad (17)$$

Появление величины ΔA обуславливает основные отличия рассматриваемого субгармонического процесса от процесса, исследованного в предыдущем случае. Области существования действительных решений (16) и (17) неодинаковы.

Из условий равенства нулю подкоренных выражений в (16) и (17) находят значения емкостей, соответствующие границам этих областей

$$c_{\min 1} = \frac{\alpha}{\omega_0^2} + 3 \frac{\beta}{\omega_0^2} \frac{E_a^2}{\omega^2} - 3 \frac{\beta}{\omega_0} \frac{E_a^2}{\omega^3}; \quad (18)$$

$$c_{\min 2} = \frac{\alpha}{\omega_0^2} + 3 \frac{\beta}{\omega_0^2} \frac{E_a^2}{\omega^2} + 3 \frac{\beta}{\omega_0} \frac{E_a^2}{\omega^3}. \quad (19)$$

При $c < c_{\min 1}$ субгармонический процесс частоты $\omega/2$ не возникает; при $c_{\min 1} < c < c_{\min 2}$ в зависимости от начальных условий реализуется процесс, соответствующий выражению (16); при $c > c_{\min 2}$ характер установившегося процесса определяется одним из выражений (15) — (17).

Аналитическое исследование диссипативной цепи с помощью результатов дает следующие корни:

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= 0, y_0 = 0; \\ x_0 &= \pm \sqrt{-\frac{1}{2} \left[\left(\frac{A - \Delta A}{B} \right) - \left(\frac{1}{\Delta AB} \frac{1}{4R^2 c^2} \right) \right] \pm} \\ &\pm \frac{1}{B} \sqrt{\frac{1}{4} (A - \Delta A)^2 - \left(\frac{A}{2\Delta A} + \frac{A^2}{4\Delta A^2} - \frac{3}{4} \right) \frac{1}{4R^2 c^2}}; \\ y_0 &= \pm \sqrt{-\frac{1}{2} \left[\left(\frac{A + \Delta A}{B} \right) - \left(\frac{1}{\Delta AB} \frac{1}{4R^2 c^2} \right) \right] \pm} \\ &\pm \frac{1}{B} \sqrt{\frac{1}{4} (A + \Delta A)^2 - \left(\frac{A}{2\Delta A} + \frac{A^2}{4\Delta A^2} + \frac{1}{4} \right) \frac{1}{4R^2 c^2}}; \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

В частном случае для консервативной цепи из (20) получаем корни (15) — (17).

Существуют значения $R = R_{\text{крит}}$, при которых прекращается рассматриваемый субгармонический процесс:

для $c < c_{\text{min}2}$

$$R_{\text{крит}} = \frac{1}{2c \sqrt{\Delta A^2 - A^2}};$$

для $c > c_{\text{min}2}$

$$R_{\text{крит}} = \frac{1}{2c\Delta A} \frac{1}{A - \Delta A} \sqrt{2A\Delta A + A^2 - 3\Delta A^2}.$$

Для определения типов особых точек используем уравнения в вариациях (12), где

$$\begin{aligned} a_{11} &= 2Bx_0y_0 - \frac{1}{2Rc}; \\ a_{12} &= A + \Delta A + 3By_0^2 + Bx_0^2; \\ a_{21} &= -A + \Delta A - 3Bx_0^2 - By_0^2; \\ a_{22} &= -2Bx_0y_0 - \frac{1}{2Rc}. \end{aligned}$$

В консервативной цепи для особой точки (15) получим:

$$\lambda_{1,2} = \pm \sqrt{-A^2 + \Delta A^2},$$

откуда следует, что это либо «седло», если $\lambda_{1,2}$ имеют действительные значения и противоположные знаки, либо «центр» (учитывая отсутствие потерь), если $\lambda_{1,2}$ — мнимые значения. На границе, разделяющей оба эти случая, соблюдается равенство $\Delta A = A$, а соответствующая емкость оказывается

равной $c_{\text{min}2}$ и ее величина может быть найдена из (19).

Для особых точек (16)

$$\lambda_{1,2} = \pm 2\sqrt{-(\Delta A A + \Delta A^2)}.$$

При всех $c > c_{\text{min}1}$ исследуемые особые точки являются особыми точками типа «центр».

Особые точки, определяемые уравнениями (17), дают:

$$\lambda_{1,2} = \pm 2\sqrt{\Delta A A - \Delta A^2}.$$

Здесь области действительных значений x_0 соответствуют емкостям $c > c_{\text{min}2}$. При этом, поскольку $\Delta A > 0$ и $A > \Delta A$, корни $\lambda_{1,2}$ оказываются действительными, а исследуемые особые точки — особыми точками типа «седло».

Для диссипативной цепи

$$\lambda_{1,2} = -\frac{1}{2Rc} \pm \sqrt{-A^2 + \Delta A^2 - 3B^2(x_0^4 + y_0^4) - 4AB(x_0^2 + y_0^2) - 2\Delta AB(x_0^2 - y_0^2) - 6B^2x_0^2y_0^2}.$$

Достаточно просто можно показать, что особая точка $x_0 = 0, y_0 = 0$ при всех $c > c_{\text{min}2}$ является «устойчивым фокусом»; при $c < c_{\text{min}2}$ она либо «седло», если $\frac{1}{2Rc} < \sqrt{-A^2 + \Delta A^2}$, либо «устойчивый узел», если $\frac{1}{2Rc} > \sqrt{-A^2 + \Delta A^2}$. Сведения о характере остальных особых точек были получены численно (табл. 2).

3. $\omega_0 = \omega, 2\omega, 3\omega$. Уравнения (5) в этом случае примут вид:

$$\left. \begin{aligned} By_0^3 + (A + Bx_0^2)y_0 + Cx_0 + D_1 &= 0; \\ -Bx_0^3 - (A + By_0^2)x_0 + Cy_0 + D_2 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Точное аналитическое решение системы (21) невозможно, поэтому она была исследована численно. Здесь, как и для $\omega_0 = \omega/2$, имеются две отличающиеся друг от друга области, границы между которыми для каждой ω_0 соответствует емкость c_{min} из (9). Также численно был исследован характер особых точек (табл. 2).

Итак, в каждом рассмотренном выше случае общее количество особых точек нечетно (табл. 2), причем число точек с индексом «+1» («узел»,

Таблица 2

Количество и типы особых точек для феррорезонансных цепей с нелинейностями, отображаемыми полиномом третьей степени

Цепь	Область	ω_0		Примечание
		$\frac{\omega}{2}$	$\omega, 2\omega, 3\omega$	
Консервативная цепь	Первая область Вторая область	2 „центра“, 1 „седло“ 3 „центра“, 2 „седла“	1 „центр“ 2 „центра“, 1 „седло“	Процессы с частотой $\omega_0 = \frac{\omega}{3}, \frac{\omega}{4}, \frac{\omega}{5}$ и т. д. имеют для диссипативной цепи одну особую точку в начале координат типа „устойчивый фокус“
Диссипативная цепь (с малыми потерями)	Первая область	2 „устойчивых фокуса“, 1 „седло“	1 „устойчивый фокус“	
	Вторая область	3 „устойчивых фокуса“, 2 „седла“	2 „устойчивых фокуса“, 1 „седло“	

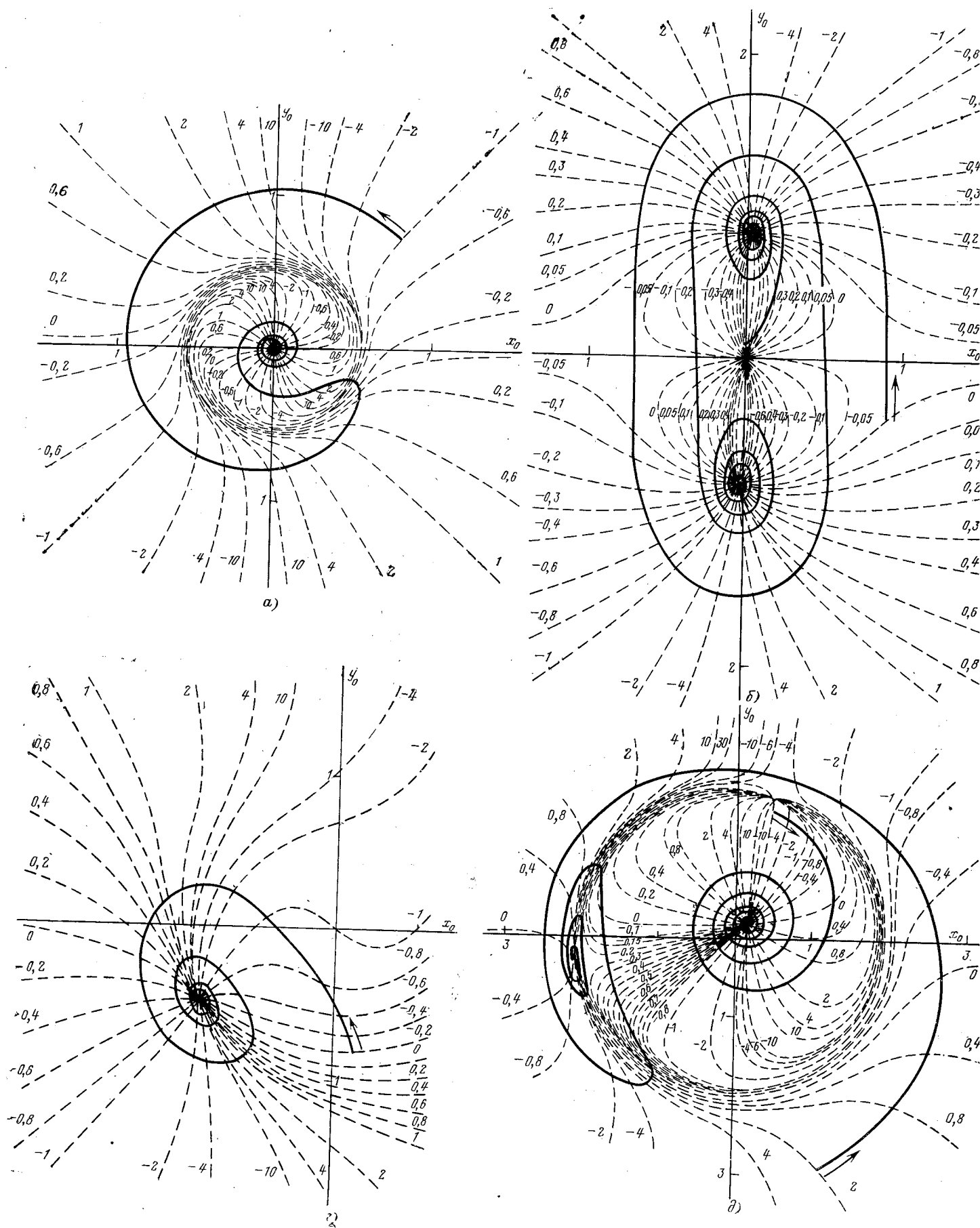


Рис. 3. Переходные процессы и особые точки для
 $a - \omega_0 = \omega/3, c = 19, R = 20$; $b - \omega_0 = \omega/2, c = 6, R = 10$
 $R = 10, \varphi = 45^\circ$; $в - \omega_0 = \omega$

«фокус», «центр») на единицу больше количества точек с индексом «-1» («седло»). Таким образом, общий индекс замкнутой кривой, охватывающей в фазовой плоскости все установившиеся решения, равен «+1». Это не противоречит общим закономерностям, отмеченным другими авторами, например, в [Л. 2].

Сравнивая структуру уравнений, входящих в системы (8), (14) и (21), можно выявить их члены, играющие активную роль в возбуждении и поддержании феррорезонансных колебаний. Такую роль для субгармонического процесса с $\omega_0 = \omega/2$ играет в (14) член ΔA , благодаря которому появляются «седловые» особые точки и, как следствие, возможность параметрического возбуждения колебаний. Член ΔA порожден особой структурой коэффициента $A_1(t)$ в (3), его периодической составляющей, которая и в уравнении Матье (4) является причиной существования неустойчивых областей. Для $\omega_0 = \omega$, 2ω , 3ω резонансные колебания определяются членами D_1 и D_2 в (21), которые, в свою очередь, появились благодаря членам соответствующей частоты в коэффициенте $A_0(t)$ системы (3). В системе же (8) ΔA , D_1 и D_2 отсутствуют, и именно это является причиной того, что субгармонические колебания частоты $\omega_0 = \omega/3$ в цепи на рис. 1 при $R \neq \infty$ и $r = 0$ не возникают. Тот же вывод был получен ранее из структуры уравнения Матье.

Таким образом, количество установившихся режимов, как устойчивых, так и неустойчивых ограничено и при заданной кривой намагничивания и

э. д. с. источника энергии зависит от величины емкости. Всей совокупности значений емкостей для каждой из рассмотренных выше частот ω_0 , начиная с $\omega/2$, соответствуют две характерные области резонансных колебаний, каждая со своим количеством и типами особых точек.

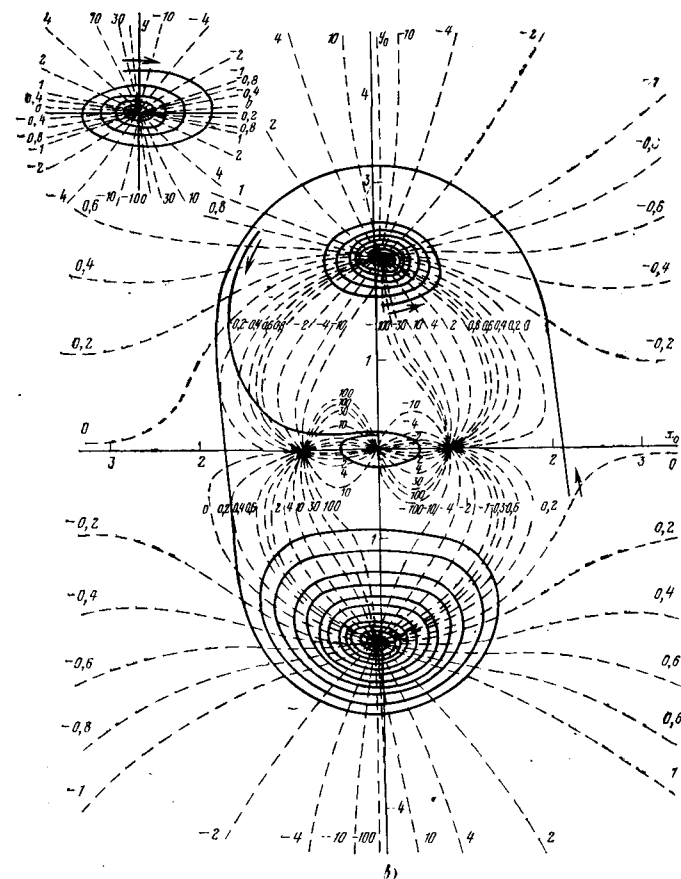
Учитывая вышеизложенное, рассмотрим переходные процессы, определяемые дифференциальным уравнением (2). Соответствующее ему уравнение (6) наиболее наглядно может быть исследовано в плоскости $x_0(t)$, $y_0(t)$ методом изоклин. Результаты проделанных с этой целью численных расчетов на ЭВМ для $\omega_0 = \omega/3$, $\omega/2$, ω при $E_a = 1$ и емкостях, соответствующих каждой из двух областей резонансных колебаний, полностью подтвердили выводы о количестве и характере особых точек. Для консервативной цепи все траектории переходных процессов оказались замкнутыми около особых точек типа «центр». Результаты расчета для диссипативной цепи показаны на рис. 3, откуда следует, что все переходные процессы при $\omega_0 = \omega/3$ (рис. 3,а) оканчиваются в начале координат, которое является устойчивым фокусом. Субгармоническому процессу $\omega_0 = \omega/2$ присуще «мягкое» в первой области (рис. 3,б) и «жесткое» во второй (рис. 3,в) возбуждение колебаний. Переходные процессы оканчиваются в особых точках типа «устойчивый фокус». Границы области «мягкого» возбуждения в точности соответствуют границам области неустойчивости, полученным при $\psi_0 = 0$ путем анализа решений уравнения Матье (рис. 2).

Поскольку форма расчетных уравнений для частот ω , 2ω и 3ω одинакова, на рис. 3,г и д приведены результаты расчета лишь для гармонических колебаний, т. е. для $\omega_0 = \omega$. В этом случае переходные процессы, помимо прочего, зависят от угла включения φ . Внешний вид интегральных кривых указывает на многообразие возможных переходных процессов при установлении гармонических колебаний.

В дополнение к вышеизложенному была исследована возможность существования при $r = 0$ комбинационных колебаний вида:

$$\psi_0 = x_0(t) \sin \omega_0 t + y_0(t) \cos \omega_0 t + a_0(t) \sin \nu_0 t + b_0(t) \cos \nu_0 t, \quad (22)$$

где дополнительная составляющая имела медленно меняющиеся амплитуды $a_0(t)$ и $b_0(t)$ и основную частоту ν_0 , равную $2\omega_0$ или $3\omega_0$. Полученная методом вариации параметров система из четырех дифференциальных уравнений не имела для установившихся режимов совместных корней резонансного характера. В зависимости от начальных условий возникали установившиеся колебания либо с основной частотой ω_0 при нерезонансных колебаниях частоты ν_0 , либо с основной частотой ν_0 при отсутствии каких-либо колебаний частоты ω_0 . В каждом из этих случаев количество и тип особых точек определялся или только основной, или только дополнительной составляющей потокосцепления в (22) и практически полностью повторялись результаты, полученные ранее для бигармонических колебаний соответствующей частоты. Естественно, что в переходных процессах наблюдалось одновременное по-



диссипативной цепи ($E_a = 1$; $\omega = 1$; $\alpha = \beta = 0,5$).
а — $\omega_0 = \omega/2$, $c = 12$, $R = 10$; б — $\omega_0 = \omega$, $c = 2$,
 $c = 3,5$, $R = 10$, $\varphi = 45^\circ$.

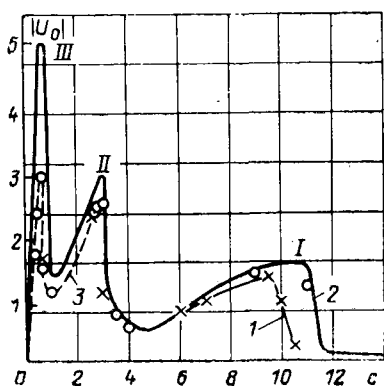


Рис. 4. Зависимость наибольших в переходном процессе амплитуд U_0 от величины емкости.
1 — $r=0,003$, $R=\infty$; 2 — $r=0$, $R=\infty$;
3 — $r=0$, $R=7$.

явление составляющих обеих частот с постепенным затуханием одной из них.

Проведенный выше анализ был сделан в предположении медленного изменения амплитуды и фазы феррорезонансных колебаний при представлении нелинейных элементов цепи полиномом третьей степени. Также было показано, что нелинейность, отображаемая двучленом пятой степени, не вносит нового качества в характер рассматриваемых явлений. Подтверждением правильности этого анализа могут служить результаты численных расчетов, проведенных на ЭВМ с использованием исходной системы (1) без упомянутых допущений и ограничений. На рис. 4 приведены результаты расчета наибольших в переходном процессе модулей амплитуд напряжения нулевой последовательности $|U_0|$ при нулевых начальных условиях. При нелинейностях, отображаемых полиномом вида $i_L = 0,5\psi + 0,5\psi^3$, и заданной емкости c находился угол включения φ , для которого феррорезонансный процесс получал наибольшее развитие, и из этого процесса выбиралась для построения величина $|U_0|$. Видна характерная зональность, причем с уменьшением емкости зона I, где преимущественно возникают колебания с $\omega_0 = \omega/2$, сменяется зоной II с $\omega_0 = \omega$, за которой, в свою очередь, следует зона III с $\omega_0 = 2\omega$. Зона с $\omega_0 = 3\omega$, по-видимому, крайне узка и на рисунке не показана. Область «мягкого» возбуждения субгармоники с частотой $\omega/2$ точно соответствует ранее полученным результатам и лежит между $c_{\min 1} = 5$ и $c_{\min 2} = 11$. Результаты расчетов, сделанных для нелинейностей, отображаемых полиномами от третьей до одиннадцатой степени [Л. 3], показывают, что зависимости $|U_0| = f(c)$ и в этом случае не изменили своего характера.

Остановимся кратко на основных результатах экспериментальных исследований в сетях энергосистем с изолированной нейтралью, аналогичных по структуре цепи рис. 1. Роль нелинейных индуктивностей в них обычно выполняют маломощные трансформаторы напряжения, и с этой точки зрения наше допущение о бесконечной мощности источника энергии является обоснованным.

В [Л. 4] анализировались феррорезонансные процессы с $\omega_0 = \omega/2$, ω , 2ω и 3ω , причем явления на частоте 3ω появлялись при особо глубоких насы-

щениях и быстро исчезали. В [Л. 5—7] приводятся осциллограммы субгармонических процессов с $\omega_0 = \omega/2$, а в [Л. 8] разбираются случаи появления феррорезонансных процессов на частоте $\omega_0 = \omega$. Автором настоящей статьи были зафиксированы процессы на частотах $\omega/2$ [Л. 3 и 9], ω и 2ω . Итак, полученное выше аналитически частотное распределение возможных феррорезонансных процессов согласуется с результатами полевых исследований и наблюдений.

Однако при учете в схеме на рис. 1 и при анализе дополнительных элементов нельзя полностью исключить возможность появления иных процессов как по частотному спектру, так и по качеству. Так, например, учет сопротивления r оказывает значительное влияние на качество установившегося феррорезонансного процесса, особенно на границах его существования, и это несколько снижает возможность непосредственного практического применения результатов аналитического исследования при таком допущении.

Действительно при $r=0$ в схеме рис. 1 появляются практически несуществующие сверхпроводящие контура (источник энергии — индуктивность) для постоянных составляющих переходного процесса, которые неизбежно в этом случае сопутствуют решениям первых трех уравнений системы (1). Существует как бы подмагничивание нелинейных элементов непрерывно циркулирующим в них постоянным током. При $r \neq 0$ постоянные токи и потоки, определяемые начальными условиями, превращаются сначала в затухающие аperiodические, оказывая существенное влияние на начальную стадию развития феррорезонансного процесса, а затем для четных ультра- и субгармоник в медленно меняющиеся периодические составляющие. Появлением последних, вероятно, объясняется обычно наблюдаемые почти периодические колебания в установившихся режимах. Учет влияния сопротивления r на механизм феррорезонансного процесса требует специального исследования.

Вместе с тем уравнения (1), а также соответствующие им уравнения из [Л. 3], позволяют проводить достаточно точные для практических целей расчеты. Так, их применение к исследованию возможных процессов в сетях со сравнительно недавно поступившими в энергосистемы трансформаторами напряжения типа НТМИ-10-66 позволило выявить область весьма высоких перенапряжений (до 5-кратных от амплитуды фазного напряжения), возникающих на частоте, близкой к 100 гц. Кроме того, эти расчеты, проверенные экспериментом в действующей сети для некоторых сочетаний параметров, установили возможность появления колебаний на частоте 150 гц вследствие специфических особенностей кривой намагничивания, подтвердили полученную здесь аналитически зональность с ее характерными частотными и иными характеристиками и позволили найти предельную величину емкости, при превышении которой невозможно возникновение любых феррорезонансных процессов в сети с трансформаторами НТМИ-10-66.

Небезынтересна, по-видимому, и расчетная возможность подбора оптимальных с точки зрения

феррорезонанса кривых намагничивания, ограничивающих перенапряжения в области малых емкостей, и токи, опасные для обмотки высокого напряжения, в области больших емкостей.

Облегчается также возможность исследования механизма феррорезонансных процессов.

Выводы. 1. Аналитическое исследование установившихся феррорезонансных процессов в схеме на рис. 1 позволило выявить присущее им ограниченное число особых точек и дискретный ряд возможных частот.

2. Это внесло определенность в последующий анализ переходных процессов. Так, для каждой из частот $\omega_0 = \omega/2$, ω , 2ω , 3ω оказалось достаточным исследование для двух характерных областей, отличающихся типом и количеством особых точек и четко обусловленными границами.

3. Результаты аналитического исследования не противоречат экспериментам и наблюдениям, проводившимся в сетях энергосистем.

4. Полученные уравнения позволяют предопределять возникновение опасных феррорезонансных

явлений при использовании новых типов трансформаторов напряжения в электрических сетях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хаяси Т. Нелинейные колебания в физических системах. М., «Мир», 1968, 292 с.
2. Долгинов А. И. Резонанс в электрических цепях и системах. М., Госэнергоиздат, 1957, 327 с.
3. Шаргородский В. Л. К расчету феррорезонансных явлений в трехфазных сетях с изолированной нейтралью. — «Электричество», 1967, № 9, с. 16—19.
4. Weller C. T. Experiences with grounded — Neutral, Y — connected potential Transformers. — «Trans. AIEE», 1931, march, pp. 299—316.
5. Удовиченко Б. А. Перенапряжения в сети 35 кв, вызванные колебаниями нейтрали. — «Электрические станции», 1947, № 1, с. 40—42.
6. Рахимов Г. Р. Феррорезонанс. Ташкент, 1957, 143 с.
7. Лихачев Ф. А. Защита от внутренних перенапряжений установок 3—220 кв. М.—Л., «Энергия», 1968, 101 с.
8. Ковалев Г. Ф. О смещении нейтрали. — «Электрические станции», 1962, № 6, с. 59—62.
9. Шаргородский В. Л. Автоколебательный процесс — причина повреждения трансформаторов напряжения. — «Электрические станции», 1963, № 5, с. 59—64.

[25.12.1973]



Советские ученые и инженерно-технические работники! Рационализаторы и изобретатели! Всемерно ускоряйте научно-технический прогресс во всех отраслях народного хозяйства, повышайте уровень научных и конструкторских разработок! Добивайтесь быстрого внедрения в производство достижений науки, техники и передового опыта!

(Из Призывов ЦК КПСС к 57-й годовщине Великой Октябрьской социалистической революции)

Работники промышленности! Боритесь за дальнейшее укрепление индустриальной мощи страны! Добивайтесь ускорения технического прогресса, лучшего использования производственных мощностей!

Шире дорогу новой технике и прогрессивной технологии!

(Из Призывов ЦК КПСС к 57-й годовщине Великой Октябрьской социалистической революции)

Повышение стойкости к частичным дуговым разрядам изоляционных полимерных материалов

Доктор техн. наук АЛЕКСАНДРОВ Г. Н., канд. техн. наук СОЛОВЬЕВ Э. П.

Ленинградский политехнический институт

Большим преимуществом полимерных изоляционных материалов по сравнению с керамическими является их технологичность, высокая механическая прочность, малый удельный вес. На основе полимеров созданы такие конструкционные изолирующие материалы как стеклопластики [Л. 1 и 2]. В СССР и за рубежом накоплен положительный опыт их эксплуатации [Л. 2 и 3]. Ряд изделий (изоляторы, изолирующие траверсы) успешно эксплуатируется уже в течение нескольких лет.

Однако широкому внедрению полимерных материалов в энергетическом строительстве препятствует их низкая стойкость к частичным дуговым разрядам (низкая трекинговая стойкость), приводящая к разрушению изоляционной поверхности в течение нескольких месяцев. Защита поверхности с помощью стойких покрытий [Л. 2] связана с необходимостью тщательной отработки мер, обеспечивающих плотное прилегание покрытий, для исключения развития частичных дуговых разрядов под покрытием. Кроме того, освоение в настоящее время покрытия (фторопластовые, полиметилметакрилатные) нетехнологичны и дороги, что значительно удорожает все изделие.

Неудачный исход всех попыток повысить трекинговую стойкость эпоксидных и других компаундов, пригодных для производства высоковольтных конструкций, определил необходимость подвергнуть критическому анализу теоретические основы этих исследований. Все работы по повышению стойкости полимеров к частичным дуговым разрядам основываются на механизме разрушения, предложенном в [Л. 4—6], согласно которому природа разрушения материала чисто тепловая. Поверхность материала нагревается вследствие теплопередачи от ствола дуги до термической деструкции. Отсюда следует, что для повышения трекинговой стойкости необходимо увеличить отвод тепла от поверхности путем повышения теплопроводности материала (введением соответствующих наполнителей). Однако результаты испытаний многих полимерных материалов указывают на отсутствие прямой связи между термостойкостью и трекинговой стойкостью. Введение неорганического наполнителя, повышающего термостойкость и теплопроводность, не всегда приводит к повышению трекинговой стойкости [Л. 7]. Кроме того, трекинговая стойкость оказалась зависящей от химического состава окружающей среды [Л. 8], что также противоречит механизму теплового разрушения материалов.

На несправедливость механизма теплового разрушения материалов указывает и длительность процесса разрушения полимеров под воздействием частичных дуговых разрядов. При испытаниях по методу проводящего тумана, воспроизводящему реальные условия возникновения частичных дуговых разрядов на изоляционной поверхности [Л. 8], следы разрушения материала появляются после нескольких часов испытаний, тогда как установившаяся температура на поверхности материала достигается в течение долей минуты [Л. 9]. Отсюда следует вывод, что температура на поверхности изоляторов оказывается недостаточной для термической деструкции материала, разрушающегося при длительном воздействии частичных дуговых разрядов другим способом. В [Л. 7] было высказано предположение об определяющем влиянии окислительных процессов на поверхности разрушающегося материала. Это предположение подтверждено рядом экспериментов и использовано в настоящей работе для создания трекинговостойких композиций.

Рассмотрим, каким образом воздействует поверхностный дуговой разряд на изолирующую поверхность.

Опорные точки дугового разряда находятся на проводящей поверхности, которой может служить пленка электролита или поверхность электрода (рис. 1, а, б), причем из-за интен-

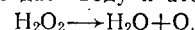
сивного испарения влаги у опорных точек, дужки постоянно перемещаются по поверхности изолятора.

После некоторого времени испытаний опорные точки дуги перемещаются с пленки электролита на изолирующую поверхность (рис. 1, в) и происходит интенсивное разрушение полимерного материала с образованием углеродного остатка. Таким образом, можно выделить две стадии разрушения диэлектриков поверхностными разрядами: на первой стадии опорные точки разряда находятся на пленке электролита или на электроде и на второй — опорные точки разряда перемещаются на изолирующую поверхность.

На первой стадии воздействие разряда на диэлектрик осуществляется через воздушный промежуток, разделяющий канал разряда и поверхность изолятора, а на второй — тепловыделение у опорных точек почти полностью идет на нагрев изоляции, температура ее при этом достигает нескольких тысяч градусов и происходит интенсивное термическое разложение материала [Л. 7].

Причина перехода опорной точки дуги с пленки электролита на изолирующую поверхность может быть только одна — снижение поверхностного сопротивления диэлектрика в месте воздействия дуги. Следовательно, для выяснения причины перехода трекинга с первой стадии во вторую необходимо определить причины снижения поверхностного сопротивления изолирующего материала на первой стадии разрушения.

Поскольку температура канала дужки составляет 3000—4000 К [Л. 9], молекулярный кислород в нем почти полностью диссоциирован и материал подвергается интенсивному воздействию атомарного кислорода при существовании на его поверхности дуговых разрядов. Поэтому представляет интерес изменение поверхностного сопротивления изолирующих материалов при воздействии на них атомарного кислорода. С этой целью образцы помещались в перекись водорода (30%), которая при разложении дает воду и атомарный кислород



При этом измерялось поверхностное сопротивление образцов различных материалов и одновременно проводились испытания материалов на стойкость к частичным дуговым разрядам.

На рис. 2 представлена зависимость удельного поверхностного сопротивления ρ_s фторопласта, полиэтилена, винипласта и эпоксиполиэфирного стеклопластика от времени воздействия на них перекиси водорода, а в табл. 1 их трекинговая стойкость. Прежде всего обращает на себя внимание, что у большинства материалов наблюдается значительное снижение ρ_s от воздействия перекиси водорода.

Из сопоставления данных рис. 2 и табл. 1 следует, что менее стойкими к воздействию поверхностных разрядов являются материалы, у которых наблюдается наибольшее уменьшение поверхностного сопротивления при воздействии атомарного кислорода, а такой материал, как фторопласт — 4,

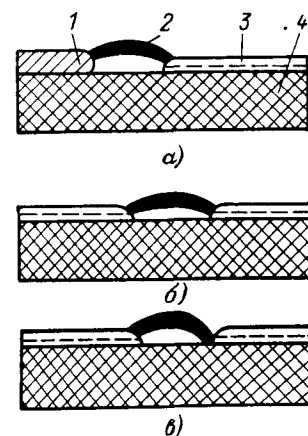


Рис. 1. Схема горения дужки на поверхности изолирующего материала.

1 — электрод; 2 — дужка; 3 — пленка электролита; 4 — изолирующий материал.

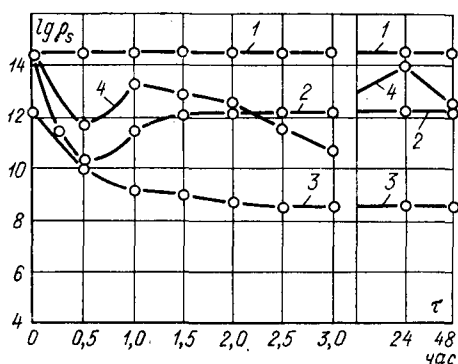


Рис. 2. Зависимость логарифма удельного поверхностного сопротивления различных материалов от времени воздействия перекиси водорода.

1 — фторопласт-4; 2 — винипласт; 3 — эпоксиполиэфирный стеклопластик; 4 — полиэтилен.

который практически не взаимодействует с кислородом, является наиболее трекингоустойчивым. Полиэтилен значительно уступает по термостойкости стеклопластику, однако он является более трекингоустойчивым материалом, так как менее подвержен воздействию атомарного кислорода.

Исследования проведены также с различными сополимерами стирола и метилметакрилата. Результаты этих исследований представлены на рис. 3 и в табл. 2.

Анализ результатов указывает на то, что у сополимеров стирола и ММК наблюдается также значительное снижение поверхностного сопротивления и имеется определенная связь между стойкостью сополимеров к окислению и трекингоустойкостью.

Так, из сравнения сополимеров стирола и ацетоксибутилена (АЦБ) видно, что более стойким к воздействию перекиси водорода (у него наблюдается меньшее изменение ρ_s) оказался сополимер с 15% АЦБ. Соответственно этот сополимер является и более трекингоустойчивым.

Представляет интерес также поведение сополимеров метилметакрилата и винилацетата. Изменение их состава приводит к изменению окислительной стойкости, что проявляется в различном уменьшении величины ρ_s . Изменяется также характер разрушения образцов. Блочный ПММК и сополимер метилметакрилата и винилацетата состава (5:5) практически не разрушились за 108 и 150 ч испытаний, заметна лишь незначительная эрозия. Сополимер состава (3:7) разрушается с образованием науглероженного следа, а сополимер состава (7:3) сильно эрозирует (рис. 4, 5).

Из данных рис. 3 и табл. 2 можно сделать вывод, что путем подбора состава полимера можно получить материал, по трекингоустойчивости не уступающий фторопласту-4. Сополи-

Таблица 1

Трекингоустойчивость различных материалов по методу „проводящего тумана“ [Л. 8]

Материал образца	Трекингоустойчивость, ч	Примечания
Фторопласт-4	>200	Следы разрушения отсутствуют
Винипласт	2,5	Трек
Эпоксиполиэфирный стеклопластик	6	Трек
Полиэтилен	20	Эрозия

Таблица 2

Трекингоустойчивость сополимеров стирола и метилметакрилата (ММК) по методу „проводящего тумана“

Материал образца	Трекингоустойчивость, ч	Примечание
Стирол+20% АЦБ	8	Трек
Стирол+5% АЦБ	4	Трек
Стирол+15% АЦБ	14	Трек
Блочный ПММК	100	Эрозия
ММК+винилацетат (5:5)	>150	Без следов разрушения
ММК+винилацетат (3:7)	47	Трек
ММК+винилацетат (7:3)	108	Эрозия

Таблица 3
Трекингоустойчивость модифицированных эпоксидных компаундов по методу „проводящего тумана“

Материал образца	Трекингоустойчивость, ч	Примечание
ЭД-5+ПН-3	>100	Трек
ЭД-5+ПН-3 ДА*	8	
ЭД-5+ПН-3+ЭА**	>100	
ЭД-5+ЭА	>100	Трек
Эпоксиполиэфирный стеклопластик [Л. 1]	7	
Стеклопластик на связующем состава ЭД-5+ПН-3+ЭА	70	Трек
ЭД-5+ПН-3+ЭА+200 весовых частей ПКП	>100	
ЭД-5+ЭА+200 весовых частей ПКП***	>100	

* ДА—диметиламин.

** ЭА—алифатическая эпоксидная смола.

*** ПКП—пылевидный кварцевый песок.

мер ММК и винилацетата состава (5:5) отвечает этому требованию.

Эти результаты позволяют поставить задачу получения трекингоустойчивых компаундов на основе эпоксидных диановых смол. Эти смолы отличаются технологичностью, а в отвержденном состоянии — влаго-химо- и атмосферостойкостью, высокими электрическими и механическими характеристиками. Производство их освоено.

В настоящее время утвердилось мнение, что на диановых эпоксидных смолах нельзя получить трекингоустойчивые композиции. Это мнение основано на представлении о термическом характере трекинга и оценке результатов воздействия поверхностных разрядов на компаунды на завершающей, второй стадии разрушения, когда опорные точки дуги перешли на изолирующую поверхность.

С учетом окислительной природы трекинга были изготовлены образцы из модифицированных эпоксидных компаундов. Результаты испытаний на трекингоустойчивость таких компаундов на основе смолы ЭД-5, представлены в табл. 3.

Как можно видеть, большинство испытанных компаундов имеет высокую трекингоустойчивость. Следует отметить, что компаунд состава ЭД-5+ЭА обладает высокой трекингоустойчивостью не только с наполнителем (200 весовых частей ПКП), но и в чистом виде. На основе этой композиции могут быть получены заливочные компаунды для опорных изолирующих конструкций и аппаратной изоляции. Из табл. 3 также видно, что эпоксиполиэфирные компаунды как наполненные, так и в чистом виде также имеют высокую трекингоустойчивость.

Следует отметить меньшую стойкость стеклопластика по сравнению со стойкостью отвержденного связующего. Это объясняется тем, что используемое стекловолокно, как показано ниже, является нестойким к воздействию окислительной атмосферы газового разряда и способствует разрушению стеклопластика. Все же стеклопластик нового состава значительно более трекингоустоек, чем ранее разработанный эпоксиполиэфирный стеклопластик.

Наряду с полимерным связующим в стеклопластике воздействию поверхностных разрядов подвергается также стеклянное волокно. Поэтому необходимо знать, насколько меняются свойства стекла при воздействии на него окислитель-

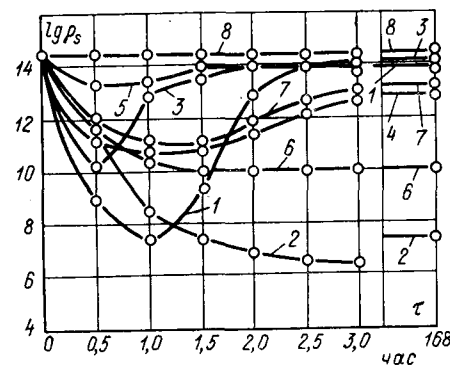


Рис. 3. Зависимость логарифма удельного поверхностного сопротивления сополимеров стирола и метилметакрилата от времени воздействия перекиси водорода.

1 — стирол+20% АЦБ; 2 — стирол+5% АЦБ; 3 — стирол+15% АЦБ; 4 — блочный ПММК; 5 — ММК+винилацетат (5:5); 6 — ММК+винилацетат (3:7); 7 — ММК+винилацетат (7:3); 8 — фторопласт-4.

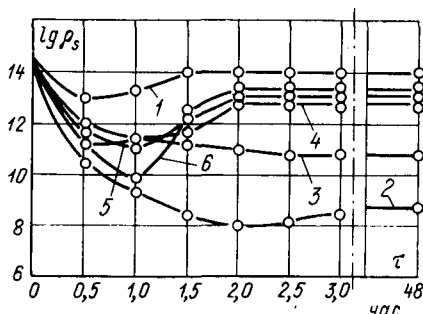


Рис. 4. Зависимость логарифма удельного поверхностного сопротивления различных стекол от времени выдержки в перекиси водорода.

1 — стекло № 427; 2 — стекло 13-B; 3 — стекло № 431; 4 — стекло № 7; 5 — кварц; 6 — стекло С-40-1.

ной атмосферы газового разряда. С этой целью различные составы стекол подвергались аналогичным испытаниям в перекиси водорода и камере проводящего тумана.

Анализ результатов испытаний, представленных на рис. 4, указывает на то, что при обработке атомарным кислородом поверхностные свойства некоторых типовых стекол претерпевают значительные изменения. Например, величина ρ_s стекла 13-B, по составу, близкому к малощелочному стеклу волокон, уменьшается до 10^8 ом.

Таким образом, при воздействии поверхностных разрядов на полимерную композицию разрушаться может не только связующее, но и неорганический наполнитель. Следовательно, для трекингостойкого стеклопластика необходимо иметь устойчивые к воздействию поверхностных разрядов как связующее, так и стеклонаполнитель.

Выводы. 1. Подбором состава полимерной композиции можно получить материал, не уступающий по трекингоустойчивости фторопласту-4, например, сополимер метилметакрилата и

винилацетата состава 5:5 или компаунд на основе диановой смолы ЭД-5.

2. Для получения трекингостойкого стеклопластика необходимо иметь устойчивое к воздействию поверхностных разрядов не только связующее, но и стеклонаполнитель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О перспективах применения стеклопластиков в высоковольтной технике. — «Электричество», 1969, № 5, с. 46—49. Авт.: Маринец Т. К., Александров Г. Н., Соловьев Э. П. и др.
2. Разработка и опытная эксплуатация стеклопластиковых изолирующих элементов воздушных линий электропередачи. — «Электрические станции», 1971, № 12, с. 53—58. Авт.: Александров Г. Н., Гольдштейн Г. С., Иващук Е. Е. и др.
3. Plastic insulators on test on 132 kv. — «Electrical Review», 1967, v. 1180, № 3, p. 90.
4. Cron H. Über Kriechspurbildung auf Isolierstoffen bei Hochspannung. — «Archiv für Elektrotechnik», 1943, Bd 37, H. 3, s. 123—137.
5. Olyphant M. Arc Resistance: Tracking Processes in Thermosetting Insulating Materials. «ASTM Bulletin», 1952, April, p. 60—67.
6. Parr D. J., Scarisbrick R. M. Performance on synthetic insulating materials under polluted conditions. «Proceedings of IEE», 1965, v. 112, № 8, p. 1625—1632.
7. Александров Г. Н., Соловьев Э. П. К вопросу трекингоустойчивости полимерных материалов. «Изв. вузов. Энергетика», 1971, № 9, с. 31—34.
8. Александров Г. Н., Зиганшина Е. Х. О методе испытаний образцов полимерных изоляционных конструкций на стойкость к поверхностным частичным разрядам. — «Электротехника», 1971, № 6, с. 57—60.
9. Климович Г. С. Температура частичных поверхностных дужек и вопросы трекинга. — «Изв. вузов. Энергетика», 1967, № 8, с. 98—100.

[26.1.1974]



УДК 621—359.5

Электризация проводящего тела в потоке заряженных диэлектрических частиц

Канд. техн. наук АБРАМЯН В. К.

Ленинградский технологический институт им. Ленсовета

В большинстве технологических процессов, связанных с обработкой и транспортировкой зернистых диэлектрических материалов (тепло-массообменные процессы в «кипящем слое», пневмотранспортировка сыпучих материалов и т. д.) происходит статическая электризация как обрабатываемого материала, так и различных деталей технологического оборудования. Отдельные изолированные от земли детали аппаратов, омываемые потоком частиц обрабатываемого материала, приобретают высокие потенциалы, которые часто становятся помехой нормальному протеканию технологического процесса, а иногда являются источником возникновения опасных электрических разрядов, которые, в свою очередь, могут вызвать взрывы и пожары.

В статье исследован процесс электризации проводящего тела, погруженного в двухфазный поток «газ — твердые частицы». С целью упрощения рассматриваемой задачи форма проводящего тела выбрана шарообразной. Исследования проведены в аппарате «кипящего слоя», схематический вид которого показан на рис. 1. Аппарат 1, конический по форме, выполнен из органического стекла и имеет следующие размеры: $d_1 = 0,19$ м, $d_2 = 0,4$ м и $H = 1,0$ м, односторонний угол конусности обечайки $\alpha = 7^\circ$. Распределительная решетка 2 — металлическая, коэффициент свободного сечения решетки равен 0,2. Ожижающим агентом служил атмосферный воздух, который подавался в аппарат с помощью воздуходувки 3. При необходимости исследования процесса электризации в аппарате с металлической стенкой внутри обечайки аппарата опускалась металлическая насадка 6. Обрабатываемым материалом служил бисерный полистирол с диаметром частиц $1,25 \div 2,50$ мм. В качестве омываемого тела использовался погруженный в слой металлический шар диаметром 6,0 мм. Предварительно

было определено, что обрабатываемый материал вследствие статической электризации приобретает преимущественно отрицательный заряд [Л. 1].

В ходе экспериментального исследования зарядки омываемого тела были использованы два метода измерения: статический и динамический. Первый включает в себя использование погруженного в слой металлического шара с присоединенным к нему электростатическим вольтметром, а второй — шара с присоединенным к нему прибором для измерения малых токов. Шар был укреплен на медном стержне 2. Для исключения наводок на стержень последний экранируется. Изоляцией 3 между стержнем 2 и экраном 4 служит фторопласт. Шар опускается в слой через боковую стенку аппарата, от которого изолируется изолятором 9.

Зависимость потенциала шара от времени, начиная с момента пуска аппарата, показана на рис. 2. Анализ полученной кривой показывает, что в момент пуска аппарата, когда происходит отрыв материала, заряженного отрицательно вследствие контактных явлений на металлической решетке, наблюдается резкий скачок отрицательного потенциала шара. Это явление можно объяснить зарядкой шара вследствие электрической индукции. Влияние контактной электризации на потенциал шара в начальный момент не является существенным.

Последнее обстоятельство можно объяснить тем, что вследствие малой площади контакта (по сравнению, скажем, с площадью контакта частиц с решеткой, где происходит первоначальная зарядка частиц) статический заряд шара оказывается намного меньше, чем индуцированный заряд. Затем наблюдается уменьшение отрицательного потенциала, а в установившемся режиме шар приобретает положительный потен-

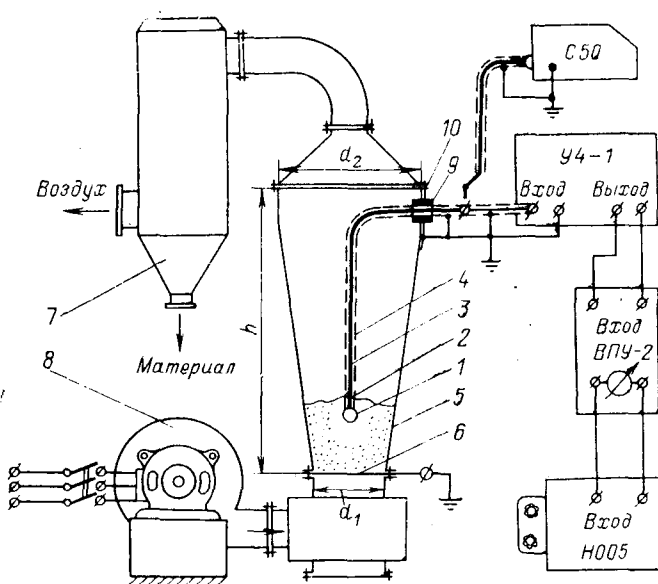


Рис. 1. Схематический вид установки «кипящего слоя».

диал. После остановки аппарата, когда устраняется влияние внешнего электрического поля, положительный потенциал шара скачком возрастает, что объясняется освобождением индуцированных положительных зарядов на шаре.

Важным моментом процесса изменения потенциала шара во времени является факт приобретения шаром положительного потенциала в установившемся режиме. Его невозможно объяснить ни контактной передачей заряда от частиц к шару, ни влиянием внешнего электрического поля объемных зарядов материала, ни действием зарядов, скапливающихся на стенках аппарата. Последнее предположение экспериментально проверено в аппарате с металлическими заземленными стенками и было установлено, что форма кривой потенциала шара в установившемся режиме осталась такой же, как и в случае аппарата из оргстекла.

Для выявления источника положительного потенциала шара была предпринята регистрация величины тока шара. Характерная кривая изменения тока шара показана на рис. 3. Из рисунка видно явное преобладание положительного тока, хотя имеются также и отрицательные импульсы измеряемого тока. Наблюдение показывает, что частота импульсов тока совпадает с частотой изменения плотности «кипящего» материала вокруг шара, т. е. пульсации электрического поля отрицательно заряженных частиц обрабатываемого материала. Зафиксированный ток и потенциал в установившемся режиме свидетельствуют о преобладании статической электризации омываемого тела над другими возможными явлениями, а именно: контактной передачей заряда от заряженных частиц к телу и действием внешнего электрического поля.

Данный вывод подкрепляется следующими теоретическими рассуждениями. Ввиду кратковременности контакта заряженной частицы с шаром, а также относительной неподвижностью

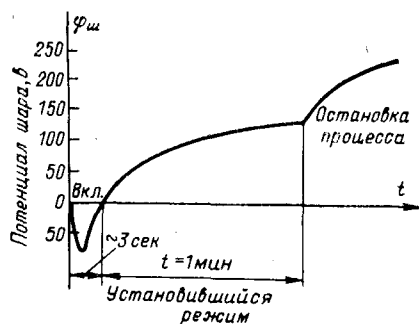


Рис. 2. Изменение потенциала шара с момента пуска аппарата. Радиус шара $r_{ш} = 6,0 \cdot 10^{-3}$ м, порозность слоя $c = 0,8$, сопротивление изоляции измерительной схемы $R_{из} \geq 10^{15}$ ом, емкость измерительной цепи $C_{сист} = 100$ пф, диаметр частиц $d_p = 2,0 \cdot 10^{-3}$ м, скорость движения частиц на месте расположения шара $w = 2,5$ м/сек [Л. 9].

носителей зарядов на поверхности диэлектрических частиц становится вероятным передача заряда от частиц к телу только с тех участков поверхности, где имеется непосредственный контакт между ними. Но на этих же участках происходит статическая электризация контактирующих поверхностей. Теоретическое значение плотности зарядов статического электричества на частицах в момент контакта σ_0 оказывается около 10^{-2} к/м². После отрыва диэлектрической частицы плотность заряда на ее поверхности обычно ограничивается газовым разрядом и для шарообразной частицы не превышает 10^{-5} к/м² [Л. 2]. В действительности она оказывается намного меньше, что подтверждается многочисленными экспериментальными данными [Л. 1 и 3]. Следовательно, при контакте такой частицы с омываемым телом, если возникшие заряды статического электричества по знаку совпадают с начальными зарядами на поверхности частиц, на контактирующих поверхностях происходит приращение заряда до плотности σ_s . После отрыва контактирующей частицы за счет газового разряда она снижается до $\sigma_p = 10^{-5}$ к/м² и таким образом оказывается больше, чем начальная плотность зарядов σ_0 на частицах. Значит, при обтекании проводящего тела диэлектрическими частицами потока, имеет место статическая электризация обтекаемого тела.

В этой связи определенный интерес представляет также выяснение возможности применения электрода-зонда, погруженного в слой для измерения электростатического поля заряженных частиц. Такой интерес объясняется появлением в последнее время многочисленных работ, в которых с целью измерения потенциала электростатического поля двухфазных потоков «газ — твердые частицы», применяется данный метод [Л. 4—6].

Известно, что зонд, погруженный в псевдооживленный слой дисперсного диэлектрического материала, может приобрести потенциал в несколько киловольт. Несложный расчет показывает, что такое значение потенциала зонда не соответствует предельно возможной напряженности внешнего поля. Последняя ограничивается разрядом (пробоем) в газовой среде и, например, в воздухе при нормальных условиях составляет около $3 \cdot 10^6$ в/м. Однако заряд, индуцированный внешним электрическим полем напряженности E на сферическом зонде радиуса r в среде с диэлектрической проницаемостью ϵ_0 , равен:

$$q = 3\pi\epsilon_0 E r^2. \quad (1)$$

Подставив сюда предельное значение напряженности и значения $\epsilon = 1$, $r = 6 \cdot 10^{-3}$ м, найдем индуцированный заряд: $q = 4,25 \cdot 10^{-9}$ к. В качестве измерительного инструмента авторы указанных работ использовали электростатический вольтметр, емкость которого невелика. Примем суммарную емкость измерительной системы, равной 25 пф, и оценим значение потенциала, сообщаемое системе индуцированным зарядом:

$$\varphi = q/C \approx 250 \text{ в}. \quad (2)$$

Существенное расхождение этой оценки с результатами, приведенными в упомянутых работах (величина потенциала зонда порядка 10 кВ) показывает, что авторы [Л. 4—6] не учли возможных источников, ошибок, а именно, статическую электризацию зонда.

В связи с этим рассмотрим кинетику заряжения шара за счет статической электризации. Представим себе, что частицы несжимаемого пылегазового потока контактируются с изолированным от земли шарообразным телом. Воспользуемся идеализацией, полагая, что количество одновременно контак-

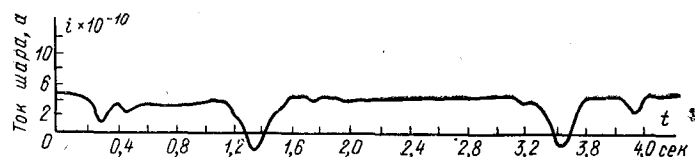


Рис. 3. Изменение тока проводящего шара с момента пуска аппарата.

Радиус шара $r_{ш} = 6,0 \cdot 10^{-3}$ м, порозность слоя $c = 0,95$; концентрация частиц в потоке $k = 1,2 \cdot 10^7$ м⁻³, диаметр частиц $d_p = 2,0 \cdot 10^{-3}$ м, относительная влажность оживающего воздуха $h = 75\%$, скорость движения частиц на месте расположения шара $w = 2,1$ м/сек [Л. 9], среднее значение измеряемого положительного тока $i_{cp} = 2,3 \cdot 10^{-10}$ а.

тирующих частиц определяется в зависимости от их концентрации k и коэффициента захвата шара b по формуле [Л. 7 и 8]:

$$N = \pi r_{\text{ш}}^2 b \frac{(1-c)^{2/3}}{0,65 d_r^2}, \quad (3)$$

где $c = 1 - \frac{1}{6} \pi k d_r^3$ — порозность слоя; d_r — диаметр частиц.

После контакта частиц первого ряда потока средняя поверхностная плотность приобретенных зарядов определяется как

$$\sigma_{\text{ш}1} = mN\Delta\sigma_p, \quad (4)$$

где $\Delta\sigma_p = \sigma_p - \sigma_0$; $m = S_k/S_{\text{ш}}$; S_k — площадь контакта, определяемая из уравнения Герца; $S_{\text{ш}}$ — площадь поверхности шара. Поверхностная плотность зарядов шара за счет контакта второго ряда равняется:

$$\sigma_{\text{ш}2} = mN\Delta\sigma_p(1-mN). \quad (5)$$

Поверхностная плотность заряда шара за счет контакта n -го ряда частиц потока

$$\sigma_{\text{ш}n} = mN\Delta\sigma_p(1-mN)^{n-1}. \quad (6)$$

Суммарная поверхностная плотность зарядов шара после контакта n рядов частиц потока:

$$\sum_{i=1}^n \sigma_{\text{ш}i} = mN\Delta\sigma_p [1 + (1-mN) + (1-mN)^2 + \dots + (1-mN)^{n+1}]. \quad (7)$$

Так как $mN < 1$, то окончательно выражение для $\sum_{i=1}^n \sigma_{\text{ш}i}$ получаем:

$$\sum_{i=1}^n \sigma_{\text{ш}i} = \Delta\sigma_p [1 - (1-mN)^n]. \quad (8)$$

Заменим дискретную функцию нарастания $\sum_{i=1}^n \sigma_{\text{ш}i}$ на непрерывную. Количество «набегающих» на шар рядов частиц за единицу времени

$$\nu = \frac{k b \omega S_M}{N}, \quad (9)$$

где S_M — Миделево сечение шара; ω — скорость частиц. Тогда окончательно для заряда шара получаем следующее выражение:

$$Q_{\text{ш}} = \Delta\sigma_p S_{\text{ш}} [1 - (1-mN)^{\nu t}] = Q_{\text{ш}0} [1 - (1-mN)^{\nu t}], \quad (10)$$

где t — время.

Отсюда потенциал шара

$$\varphi_{\text{ш}} = r_{\text{ш}} \frac{\Delta\sigma_p}{\epsilon_0} [1 - (1-mN)^{\nu t}] = \varphi_{\text{ш}0} [1 - (1-mN)^{\nu t}]. \quad (11)$$

При $t \rightarrow \infty$ $\varphi_{\text{ш}} = \varphi_{\text{ш}0} = r_{\text{ш}} \frac{\Delta\sigma_p}{\epsilon_0}$, т. е. с увеличением радиуса шара увеличивается установившийся потенциал. С учетом равенства $\Delta\sigma_p = \frac{\epsilon_0}{\delta} \Delta u$ отношение $\frac{r_{\text{ш}}}{\delta}$ указывает на возможность приобретения шаром больших потенциалов ($\delta \approx 10^{-8}$ м [Л. 3]).

Напряженность поля на поверхности шара

$$E_{\text{ш}0} = \frac{\Delta\sigma_p}{\epsilon_0} < E_{\text{пр}} = \frac{\sigma_p}{\epsilon_0},$$

где $E_{\text{пр}}$ — пробивная напряженность поля.

Данное выражение говорит о том, что в рассматриваемых условиях напряженность поля на поверхности шара никогда не может достигнуть своего пробивного значения. А это, в свою очередь, свидетельствует об ограничении заряда только утечками через окружающую среду и изоляторы.

Рассмотрим два характерных случая: $r_{\text{ш}} = 1$ м; $\sigma_0 = 0$, т. е. $\Delta\sigma_p = \sigma_p = 1,6 \cdot 10^{-5}$ К/м², тогда $\varphi_{\text{ш}} = 10^6$ В; $r_{\text{ш}} = 1$ м; $\sigma_0 = \sigma_p$, т. е. $\Delta\sigma_p = 0$, тогда $\varphi_{\text{ш}} = 0$.

Отсюда можно сделать вывод, что, когда шар находится в потоке незаряженных частиц, он приобретает большой потенциал. Когда шар находится в потоке диэлектрических частиц заряженных предельными зарядами насыщения, то статическая электризация шара отсутствует. Второй вывод имеет чисто теоретический интерес, так как указанное условие на практике не соблюдается.

С учетом обратных утечек можно писать:

$$i_{\text{обш}} = i_{\text{эл}} - i_{\text{в}} - i_{\text{из}}, \quad (12)$$

где $i_{\text{обш}}$ — результирующий ток заряжения; $i_{\text{эл}}$ — ток заряжения без учета обратных утечек; $i_{\text{в}}$ — ток проводимости воздуха; $i_{\text{из}}$ — ток проводимости изоляторов.

Выражение (12) можно переписать в виде:

$$\frac{dQ_{\text{ш}}}{dt} = i_{\text{эл}} - Q_{\text{ш}} \frac{\lambda}{\epsilon_0} - Q_{\text{ш}} \frac{1}{C_{\text{сист}} R_{\text{из}}}, \quad (13)$$

где λ — электропроводность окружающей среды; $R_{\text{из}}$ — сопротивление изоляции шара; $C_{\text{сист}}$ — емкость измерительной цепи.

Решение этого уравнения имеет вид:

$$Q_{\text{ш}} = 4\pi r_{\text{ш}}^2 \Delta\sigma_p \left[1 + \frac{N \left(\frac{\lambda}{\epsilon_0} + \frac{1}{C_{\text{сист}} R_{\text{из}}} \right)}{\pi k b r_{\text{ш}}^2 \omega \ln(1-mN)} \right]^{-1} \times [1 - (1-mN)^{\nu t}]. \quad (14)$$

Окончательное выражение для потенциала шара в установившемся режиме (при $t \rightarrow \infty$):

$$\varphi_{\text{ш}} = \frac{r_{\text{ш}} \Delta\sigma_p}{\epsilon_0} \left[1 + \frac{N \left(\frac{\lambda}{\epsilon_0} + \frac{1}{C_{\text{сист}} R_{\text{из}}} \right)}{\pi k b r_{\text{ш}}^2 \omega \ln(1-mN)} \right]^{-1}. \quad (15)$$

Принимая значения: $b = 0,9$, $\lambda = 1,0 \cdot 10^{-16}$ Ом⁻¹·м⁻¹, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, $S_k = 10^{-8}$ м² [Л. 3, 8 и 9] и используя результаты эксперимента (рис. 2), для выражения, заключенного в квадратные скобки, получаем значение около 1,1, т. е. потенциал шара в установившемся режиме практически определяется величиной сомножителя $\left(\frac{r_{\text{ш}} \Delta\sigma_p}{\epsilon_0} \right)$.

По опытным данным значение $\Delta\sigma_p$ оказывается равным около 10^{-6} К/м². При этом значение $\varphi_{\text{ш}}$ при остановке процесса, т. е. при устранении влияния внешнего электрического поля равно приблизительно 0,3 кВ. Эта величина с учетом выражения, заключенного в квадратные скобки, а также возможного влияния третьего сомножителя уравнения (11) удовлетворительно согласуется с экспериментальным значением потенциала шара (рис. 2).

Анализ полученных экспериментальных и теоретических данных позволяет обосновать способ зондового измерения заряда частиц в двухфазных потоках «газ — твердые диэлектрические частицы». Изменяемый в этом случае ток от зонда определяется по формуле:

$$i_a = k \omega b S_M S_k (\sigma_p - \sigma_0). \quad (16)$$

Получая экспериментальные значения k , ω , b , S_M , S_k , σ_p и i_a , можно определить средний заряд потока частиц: $q_{\text{ш}0} = \sigma_0 S_{\text{ш}}$. Принимая значения: $b = 0,9$; $S_k = 10^{-8}$ м², $\Delta\sigma_p \approx 1,0 \cdot 10^{-6}$ К/м² [Л. 3 и 8], получаем для i_a значение $2,9 \cdot 10^{-10}$ А. Это удовлетворительно согласуется со средним значением тока от зонда, полученным из эксперимента (рис. 3).

Основным недостатком данного метода измерения $q_{\text{ш}0}$ является трудность точного определения значения параметров S_k и $\Delta\sigma_p$. Правильный выбор этих параметров во многом определяет надежность полученных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамян В. К., Бекашев Р. Х. Некоторые закономерности симметричного заряжения частиц полимерного материала в аппаратах кипящего слоя. — «Изв. вузов. Химия и химическая технология», 1972, 8, 15, с. 1222—1225.
2. Rose G. S., Ward S. G. Contact electrification across metal — dielectric and dielectric — dielectric interfaces. — «British Journal of Applied Physics», 1957, vol. 8, № 3, p. 121—126.

3. Статическое электричество в химической промышленности. Под ред. Н. Г. Дроздова. М., «Химия», 1971, 208 с.

4. Ганжа В. Л. О механизме электризации в псевдоожигенном слое. — «ИФЖ», 1967, 2, 13, с. 243—249.

5. Кисельников В. Н., Вялков В. В., Филатов В. М. К вопросу об электростатических явлениях в кипящем слое. — «Изв. вузов. Химия и химическая технология», 1966, 6, 9, с. 964—969.

6. Ciborowski J., Wolodarski A. On electrostatic effects in fluidized beds. — «Chem Engng. Sci.», 1962, vol. 17, № 1, pp. 23—32.

7. Забродский С. С. Гидродинамика и теплообмен в псевдоожигенном (кипящем) слое. М., Госэнергоиздат, 1963, 488 с.

8. Левин Л. М. Исследование по физике грубодисперсных материалов. М., Изд. АН СССР, 1961, 267 с.

9. Имянитов И. М. Приборы и методы для измерения электричества атмосферы. М., Гостехиздат, 1957, 536 с.

10. Абрамян В. К., Бекашев Р. Х. Датчик скорости заряженных частиц. А. С. № 331314 (СССР). Опул. в бюл. — «Изобретения. Пром. образцы. Товарные знаки», 1972, № 9.

[25.7.1974]

УДК 621.313.322.001.4

Испытания асинхронизированного генератора мощностью 50 Мв·а в динамических режимах

ГУРЬЯНОВ С. И., ЗАРХИ М. И., МЕШКОВ В. Н., ФЕЙГИН С. Г., ФИЛИЧЕВ О. Н.

Колэнерго,

БЛОЦКИЙ И. Н., БОТВИННИК М. М., КЛИМОВ Б. П., МАМИКОНЯНЦ Л. Г.,
ФЕЗИ-ЖИЛИНСКАЯ М. С., ШАКАРЯН Ю. Г.

ВНИИЭ,

РАГОЗИН А. А., ЯКОВЛЕВ О. И.

Ленгидропроект

В [Л. 1] приведены результаты промышленных испытаний асинхронизированного синхронного генератора (АСГ) мощностью 50 Мв·а. В настоящей статье описываются результаты испытаний АСГ в динамических режимах — при трехфазных коротких замыканиях в сети.

Эти испытания преследовали такие цели: проверить работоспособность АСГ, системы управления АСГ в аварийной ситуации и получить экспериментальное подтверждение высоких динамических свойств АСГ.

Исходя из общих физических представлений, а также основываясь на результатах исследований [Л. 2 и 3], можно утверждать, что АСГ имеет следующие преимущества перед синхронными машинами в отношении их динамической устойчивости:

возможность работы в исходном установившемся режиме со скоростью, меньшей синхронной (с отрицательным скольжением);

возможность воздействия в течение переходного (аварийного и послеаварийного) процесса не только на величину, но и на фазу (пространственное положение) вектора э. д. с. E или E' генератора.

Остановимся несколько подробнее на указанных факторах.

Расчеты на ЭВМ показывают, что заданному значению «потолочного» напряжения на обмотке ротора $U_{пот}$ соответствует некоторое предельное скольжение $s_{пр}$, такое, что, если в аварийном режиме скольжение ротора окажется больше $s_{пр}$, то синхронная динамическая устойчивость, иначе говоря, жесткая устойчивость генератора, нарушится [Л. 3 и 4]; при $s \leq s_{пр}$ динамическая устойчивость может быть обеспечена.

Достаточно простой анализ показывает, что предельное время трехфазного короткого замыкания АСГ определяется выражением:

$$\Delta t_{к.з} = \frac{J}{M_T} (s_{пр} - s_0), \quad (1)$$

где s_0 — скольжение АСГ в исходном установившемся режиме.

Отсюда видно, что чем больше отрицательное скольжение s_0 , тем больше время $\Delta t_{к.з}$.

Для примера приведем некоторые данные расчетов, выполненных во ВНИИЭ¹, для простого случая — работы генератора через реактивное сопротивление x_d на мощную энергосистему.

При $U_{пот} = 4U_{f(s=0)}$ ($U_{f(s=0)}$ — напряжение на кольцах ротора при $s=0$ и номинальной нагрузке), $x_d = 0,2$, $M_T = 0,8$, о. е. и $J = 9,1$ сек скольжение $s_{пр}$ оказалось равным 0,02. Из (1) получим, что при $s_0 = 0$ время $\Delta t_{к.з} = 0,23$ сек, а при $s_0 = -0,005$ оно возрастает до 0,284 сек. Как показали расчеты, время $\Delta t_{к.з} = 0,23$ сек соответствует и тому случаю, когда упомянутый генератор работает как синхронный. Итак,

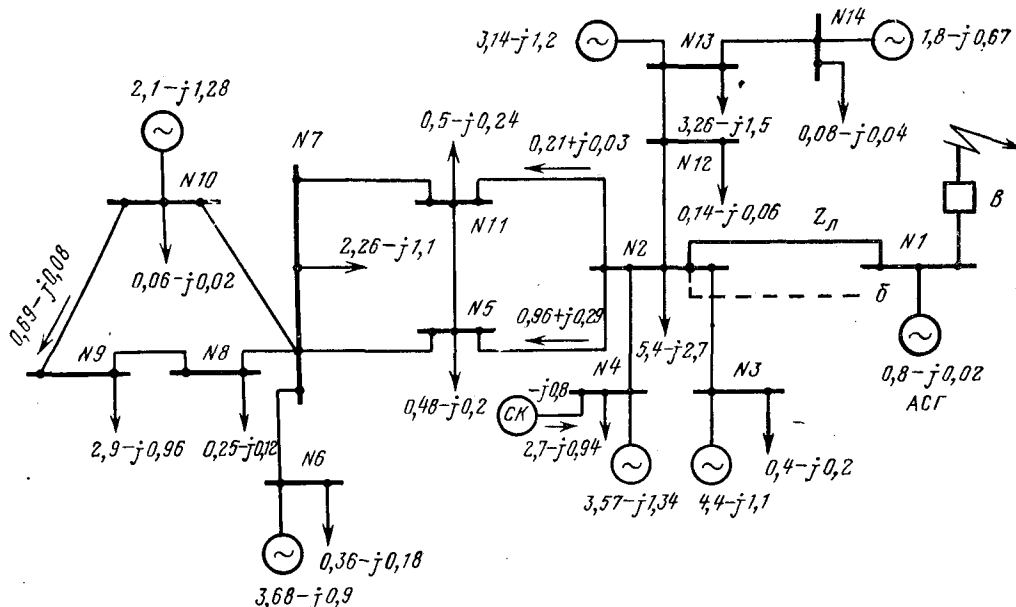


Рис. 1. Схема испытаний.

¹ Расчеты проводились на ЦВМ М-220 по известным уравнениям Горева — Парка; активное сопротивление и переходный процесс в статоре не учитывались.

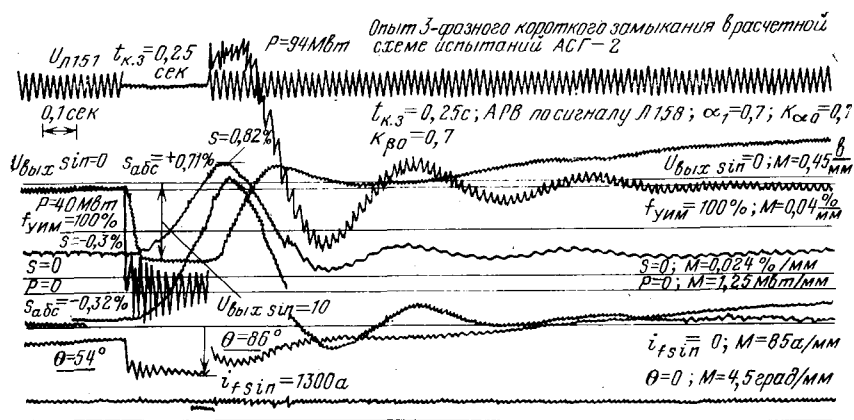


Рис. 2. Осциллограмма режима короткого замыкания.

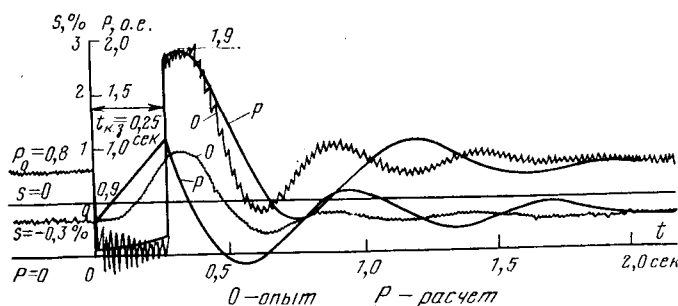


Рис. 3. Кривые переходного процесса полученные на ЭВМ.

в рассматриваемом примере выигрыш во времени $\Delta t_{к.з.}$ при работе машины в асинхронизированном режиме (по сравнению с синхронным режимом) составляет 23%.

Во время переходного процесса, в частности при трехфазном коротком замыкании, векторы \vec{E} и \vec{E}' синхронных машин изменяют свое пространственное положение — следуют за углом поворота ротора δ .

В отличие от синхронной машины угол поворота этих векторов у асинхронизированных синхронных машин теоретически должен быть равным нулю и не зависеть от значений угла поворота ротора. Однако практически угловое положение векторов э. д. с. АСГ изменяется, так как $U_{f \text{ пот}}$ имеет ограниченное значение. Чем больше значение $U_{f \text{ пот}}$, тем при прочих равных условиях меньше приращение угла поворота векторов \vec{E} или \vec{E}' во время аварии.

В АСГ имеется возможность воздействия на изменение фазы этих э. д. с. так, чтобы (при заданном значении $U_{f \text{ пот}}$) обеспечить наибольшее значение среднего электромагнитного момента во время переходного процесса. Достигается это тем, что в АСГ используется так называемый «аварийный» закон управления, отличающийся от закона управления в установившемся режиме. Существо «аварийного» закона управления заключается в том, что в момент аварии резко изменяется фаза вектора напряжения U_f (что достигается изменением напряжений U_{fq} и U_{fd}), а его амплитуда форсируется. Требуемое оптимальное значение фазы этого вектора может быть определено, например, расчетным путем.

Расчеты на ЭВМ показали, что при применении «аварийного» закона управления удалось при $s_0=0$ и $U_{f \text{ пот}}=4$ о. е. увеличить время $\Delta t_{к.з.}$ с 0,23 до 0,27 сек. При начальном скольжении $s_0=-0,005$ время $\Delta t_{к.з.}$ возросло еще больше — до 0,3 сек.

В описываемых ниже экспериментах использовался, однако, один и тот же закон управления АСГ как в установившемся, так и в переходном режимах.

Закон управления генератора учитывал обратные связи по скольжению генератора, токам ротора, напряжению статора [Л. 1 и 3]. Структурная схема системы управления испытуемого генератора приведена в [Л. 1]. Схема энергосистемы

во время эксперимента показана на рис. 1. Испытуемый АСГ ориентировался относительно вектора напряжения шин №2. Иначе говоря, использовался закон управления установившегося режима. В качестве канала для телепередачи угла в описываемых экспериментах использовалась холостая линия передачи, показанная на рис. 1 пунктиром². К моменту проведения испытаний устройство ВЧ телепередачи угла, установленное на станции, было отлажено, но проверено лишь в установившемся режиме.

Испытуемый генератор включался на трехфазную короткую выключателем В. Через время $\Delta t_{к.з.}$ выключатель автоматически отключался.

Потокораспределение в исходном режиме энергосистемы показано на рис. 1. Начальное скольжение АСГ составляло $s_0=0,003$ (0,3%).

Коэффициенты регулирования были установлены такими, чтобы обеспечивалось хорошее качество установившегося режима и требуемое значение жесткости характеристики $M(s)$.

Так, колебания активной и реактивной мощности генератора были равны $\pm 0,5$ Мвт и ± 1 Мвар соответственно, жесткость характеристики $M(s)$ была такой, что при изменении нагрузки генератора от нуля до номинального значения скольжение изменялось всего на 0,2%.

Было проведено два опыта трехфазного короткого замыкания длительностью 0,19 и 0,25 сек. Динамическая устойчивость генератора в обоих случаях обеспечивалась с достаточно большим запасом. Расчеты, выполненные по программе для ЭВМ, разработанной Ленгидропроект совместно с ВНИИЭ, ЛПИ и Колэнерго, показывают, что предельное время $\Delta t_{к.з.}$ для рассматриваемой схемы энергосистемы оказывается равным 0,35 сек.

Осциллограмма переходного процесса при $\Delta t_{к.з.}=0,25$ сек приведена на рис. 2. Как видно из рисунка, абсолютное скольжение генератора относительно синхронной оси 50 гц изменялось от $-0,28$ до $+0,84\%$, а скольжение относительно шин подстанции I изменялось от $-0,26$ до $0,6\%$.

Демпфирование колебаний генератора в послеаварийном режиме характеризуется практически одним-двумя качаниями ротора. Это обстоятельство указывает на высокие динамические свойства АСГ в переходных режимах.

Практически через 1,5 сек после начала аварии переходный процесс заканчивается, и восстанавливается установившийся режим. Испытания подтвердили также достаточную работоспособность всех элементов системы управления АСГ и всего установленного оборудования в аварийной ситуации.

Из рис. 3 видно, что приведенные на нем расчетные и экспериментальные кривые практически совпадают. Так, максимальное значение электромагнитной мощности и характер ее изменения в послеаварийном режиме практически одинаковы. Максимальное скольжение ротора агрегата, полученное расчетным путем, несколько выше, чем при эксперименте. Последнее обусловлено тем, что при расчетах не учитывались дополнительные тормозные электромагнитные моменты, возникающие при коротких замыканиях, а именно: знакопеременная составляющая электромагнитного момента и момент потерь из-за апериодической составляющей тока статорной цепи.

Вывод. Испытания показали, что генератор имеет высокие динамические свойства и может быть включен на длительную опытно-промышленную эксплуатацию в энергосистеме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Промышленные испытания асинхронизированного генератора 50 Мва. — «Электричество», 1973, № 4. Авт.: Зархи М. И., Гурьянов С. И., Мешков В. Н. и др.
2. Ботвинник М. М. Асинхронизированная синхронная машина. М., Госэнергоиздат, 1960.
3. Ботвинник М. М., Шакарян Ю. Г. Управляемая машина переменного тока. М., «Наука», 1964.
4. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М., Госэнергоиздат, 1970.

[30.5.1974]

² При применении определенных «аварийных» законов в процессе короткого замыкания такая информация может и не потребоваться.



Аппроксимация оценок корреляционной функции в энергоснабжении электрических железных дорог

НИКИТИН Ю. М.

Москва

На первом этапе создания автоматической системы управления (АСУ) элементами системы энергоснабжения электрических железных дорог должно быть произведено подробное системное исследование. В процессе этого исследования требуется получить статистические характеристики процессов изменения тока и напряжения в отдельных элементах системы энергоснабжения. При последующем моделировании на ЭВМ как самой системы энергоснабжения, так и модели АСУ с целью оптимизации структуры последней, часть элементов системы энергоснабжения может быть исключена и заменена моделью процесса, воспроизводимой на ЭВМ по статистическим характеристикам, полученным в процессе системного исследования.

Случайный процесс изменения тока нагрузки тяговой подстанции можно представить в виде следующей математической модели:

$$i(t) = m(t) + \varepsilon(t) + \xi(t), \quad (1)$$

где $i(t)$ — ток нагрузки; $m(t)$ — математическое ожидание, зависящее от времени; $\varepsilon(t)$ — случайная дифференцируемая составляющая; $\xi(t)$ — пусковые токи электровозов.

Задача выделения математического ожидания $m(t)$ в случайных процессах изменения тока нагрузки в устройствах энергоснабжения рассматривалась в [Л. 1]. Пусковые токи электровозов хорошо описываются пуассоновским потоком событий, поскольку являются достаточно редкими событиями, и их появление совершенно не зависит от пусков в другие моменты времени [Л. 2]. Кривые изменения тока, потребляемого электроподвижным составом, являются решением системы дифференциальных уравнений движения поезда, что заведомо предопределяет существование производной. Ток нагрузки тяговой подстанции и ее фидеров является суперпозицией этих кривых в случайном числе и со случайным сдвигом, что предопределяет дифференцируемость случайной составляющей $\varepsilon(t)$.

Важной характеристикой централизованной случайной составляющей $\varepsilon(t)$ является ее корреляционная функция. Широкое распространение при исследовании токов нагрузки и напряжения в устройствах энергоснабжения получили методы определения оценок корреляционной функции по формулам, использующим гипотезу об эргодичности составляющей $\varepsilon(t)$. Расчет оценок ординат корреляционной функции ведется по известной формуле [Л. 3]:

$$\hat{K}(j\Delta\tau) = \frac{1}{N-j} \sum_{k=1}^{N-j} [i(k\Delta\tau) - m(k\Delta\tau)] [i\{(k+j)\Delta\tau\} - m\{(k+j)\Delta\tau\}], \quad (2)$$

где $\Delta\tau$ — промежуток времени между за мерами значений случайного процесса; $m(k\Delta\tau)$ — значение математического ожидания в момент замера; $i(k\Delta\tau)$ — значение случайного процесса в момент замера; N — общий объем выборки.

От оценок корреляционной функции можно перейти к оценкам нормированной корреляционной функции по формуле:

$$\hat{\rho}(j\Delta\tau) = \frac{\hat{K}_1(j\Delta\tau)}{\hat{K}(0)}. \quad (3)$$

По мере увеличения номера замера j увеличивается дисперсия оценок ординат корреляционной функции $\hat{K}(j\Delta\tau)$. Кроме того, соседние оценки ординат сильно коррелированы [Л. 3]. Все это приводит к «раздуванию» оценок корреляционной функции с увеличением τ , причем эмпирическая корреля-

ционная функция долго остается выше или ниже истинной кривой.

С целью исследования действительного положения на ЭВМ воспроизводился эргодический стационарный процесс по корреляционной функции вида:

$$\hat{K}(\tau) = e^{-|\tau|} (\cos \tau + \sin |\tau|). \quad (4)$$

Случайный процесс моделировался с шагом $\Delta\tau = 0,2 \times 10^{-3}$ сек, причем в массив для образования выборки с целью последующей статистической обработки засылалось каждое пятидесятое значение процесса $\varepsilon(t)$, т. е. в данном случае $\Delta\tau = 0,1$ сек. Всего обрабатывалось 1500 значений ординат случайного процесса $\varepsilon(t)$. Результаты обработки по формулам (2) и (3) представлены в виде $\hat{\rho}(\tau)$ на рис. 1. Там же приводится и истинная корреляционная функция $\rho(\tau)$.

Как видно из рис. 1, эмпирическая нормированная корреляционная функция $\hat{\rho}(\tau)$ значительно отличается от истинной $\rho(\tau)$, причем оценкам $\hat{\rho}(\tau)$ присущи все недостатки, на которые указывалось выше: из-за коррелированности ординат эмпирической корреляционной функции кривая $\hat{\rho}(\tau)$ достаточно долго остается выше или ниже оси τ , так что практически невозможно определить период колебаний функции $\rho(\tau)$; функция $\hat{\rho}(\tau)$ «раздувается» с увеличением τ .

Важно отметить, что на начальном участке $0 \leq \tau \leq 1,4$ сек кривые $\rho(t)$ и $\hat{\rho}(t)$ практически совпадают; относительная погрешность оценок составила 0,6%.

Как следует из общей теории случайных процессов [Л. 3], корреляционная функция не может быть определена точно по конечной реализации, поэтому возникает задача ее аппроксимации. Наиболее широко распространена аппроксимация корреляционными функциями, имеющими дробно-рациональную спектральную плотность [Л. 3]. Такие корреляционные функции имеют вид:

$$K(\tau) = \sigma^2 \sum_{k=1}^q e^{-\beta_k |\tau|} [a_k(\tau) \cos \omega_k \tau + b_k(\tau) \sin \omega_k |\tau|], \quad (5)$$

где β_k — коэффициенты; $a_k(\tau)$, $b_k(\tau)$ — полиномы от τ .

В [Л. 3] показано, что дифференцируемые процессы в электрических цепях хорошо аппроксимируются корреляционной функцией

$$K(\tau) = \sigma^2 e^{-\alpha |\tau|} \left(\cos \beta \tau + \frac{\alpha}{\beta} \sin \beta |\tau| \right), \quad (6)$$

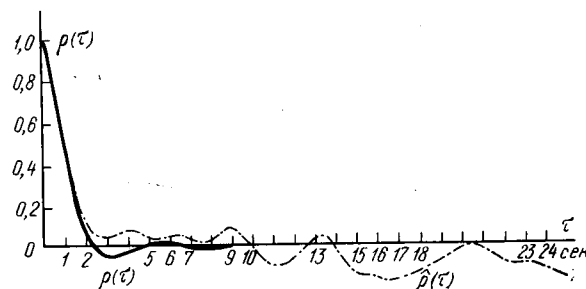


Рис. 1.

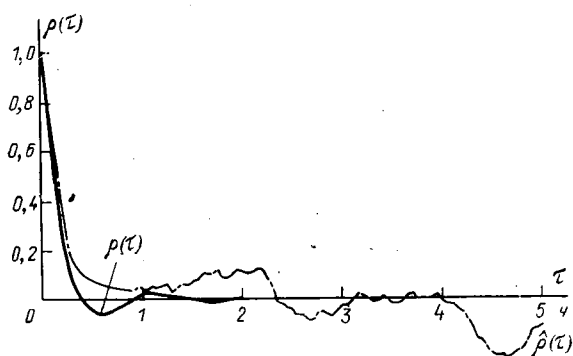


Рис. 2.

содержащей периодическую составляющую. Корреляционная функция (6) является частным случаем функции (5). В процессе аппроксимации по оценкам корреляционной функции, полученным по формуле (2), следует подобрать наилучшие оценки для α и β , поскольку оценка σ^2 получается автоматически и равна $\hat{K}(0)$.

Для определения оценок α и β в [Л. 3] предлагается решить систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} e^{-\alpha \tau_1} \left(\cos \beta \tau_1 + \frac{\alpha}{\beta} \sin \beta \tau_1 \right) &= \hat{p}(\tau_1); \\ e^{-\alpha \tau_2} \left(\cos \beta \tau_2 + \frac{\alpha}{\beta} \sin \beta \tau_2 \right) &= \hat{p}(\tau_2). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Потребовав, чтобы аппроксимирующая функция имела первый нуль и первый минимум в тех же точках, что и эмпирическая корреляционная функция, для оценок коэффициентов α и β в [Л. 3] получены аналитические выражения. Как видно из рис. 1, первое пересечение оси τ эмпирической корреляционной функцией отстоит достаточно далеко от времени обращения истинной корреляционной функции в нуль.

Можно сделать этот метод более точным, если брать значения эмпирической корреляционной функции $\hat{p}(\tau_1)$ и $\hat{p}(\tau_2)$ ближе к началу координат. Решение системы (7) в этом случае получается численными методами.

Применение процедуры метода скорейшего спуска [Л. 4] для оценки коэффициентов α и β эмпирической корреляционной функции, представленной на рис. 1, позволило получить значения $\hat{\alpha}=1,014$ и $\hat{\beta}=0,991$, в то время как истинные значения α и β равны единице в соответствии с (4). Погрешность в определении параметров составила 1,4%.

Па одной из тяговых подстанций постоянного тока определялись характеристики случайного процесса изменения напряжения на шинах постоянного тока. Вычисление оценок коэффициентов α и β в соответствии с рассмотренной методикой дало значения $\hat{\alpha}=0,205 \cdot 10^{-2}$ и $\hat{\beta}=0,175 \cdot 10^{-2}$. На рис. 2 пунктирной линией представлена эмпирическая корреляционная функция, сплошной — ее аппроксимация.

Проверка эквивалентности реального и аппроксимирующего процессов, проведенная методом моделирования и сравнения продолжительности выбросов, показала, что гипотеза об однородности выборок не противоречит полученным результатам с доверительной вероятностью 0,95. Результаты проверки именно этой аппроксимации приведены в [Л. 5].

Полученные аппроксимации корреляционных функций токов нагрузки могут быть использованы при решении задач, связанных с нагревом электрических машин, проводов и аппаратов; соответствующие характеристики напряжения могут быть использованы при оптимальном выборе уставок регуляторов напряжения с зоной нечувствительности и выдержкой времени на переключение [Л. 6]. В этих случаях составляющей $\xi(t)$ можно пренебречь. Однако при выборе уставок защит фидеров контактной сети следует дополнительно определить характеристики процесса $\xi(t)$.

Выводы. 1. Прямое моделирование случайного процесса по заданной корреляционной функции показало, что достаточно достоверными следует считать ординаты эмпирической корреляционной функции, расположенные вблизи начала координат.

2. Для оценки параметров корреляционной функции следует брать значения ее оценок, расположенные в начале координат. Стремление повысить точность этих оценок за счет увеличения числа точек эмпирической корреляционной функции может привести к негативным результатам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никитин Ю. М. Метод статистического исследования нестационарных случайных процессов в энергоснабжении. — «Электричество», 1971, № 2, с. 25—30.
2. Марквардт Г. Г. Применение теории вероятностей и вычислительной техники в системе энергоснабжения. М., «Транспорт», 1972, 224 с.
3. Свешников А. А. Прикладные методы теории случайных функций. М., «Наука», 1968, 464 с.
4. Демидович Б. П., Марон И. А. Основы вычислительной математики. М., Физматгиз, 1960, 659 с.
5. Никитин Ю. М. Метод цифрового моделирования случайных процессов в устройствах энергоснабжения. — «Электричество», 1972, № 10, с. 20—23.
6. Никитин Ю. М. Особенности применения градиентного метода оптимизации для настройки локальных регуляторов в устройствах энергоснабжения. — «Электричество», 1972, № 8, с. 32—36.

[21.6.1974]



УДК 621.311.018.41

Исследование режимов энергосистем с АЭС при снижении частоты и работе АЧР

Канд. техн. наук АЙРАПЕТАН Г. А., инж. АЙРАПЕТАН Ю. И.

Ереванский политехнический институт

Выбор структуры и уставок АЧР в энергосистеме во многом определяется составом электростанций, участвующих в покрытии графика нагрузки. В литературе освещены вопросы режимов ТЭС при понижении частоты в энергосистеме и даны рекомендации по выбору уставок АЧР [Л. 1]. Особый интерес представляет изучение в этих режимах поведения АЭС, удельный вес которых все возрастает. В настоящее время разработаны достаточно надежные схемы собственных нужд АЭС, однако мощные потребители, какими являются главные циркуляционные (ГЦН) и питательные (ПЭН) электронасосы, получают питание от источников, в электрическом или механическом отношении связанных с частотой энергосистемы.

В статье освещены результаты исследований режимов энергосистем, включающих АЭС, при снижении частоты и ра-

боте АЧР. Математическая модель рассматриваемых процессов составлена с учетом следующих условий и основных допущений:

1. Уравнения составлены в относительных изменениях.
2. В рассматриваемой гипотетической энергосистеме 50% выдаваемой мощности генерируется на АЭС, т. е. $k_{\text{АЭС}} = P_{\text{АЭС}}/P_{\text{ген.с}} = 0,5$. АЭС представлены агрегатом единичной мощности с относительными параметрами, эквивалентными энергоблоку двухконтурной АЭС с реактором ВВЭР-440, шестью парогенераторами ПГВ-4, двумя турбинами К-220-44, работающими в блоке с генераторами ТВВ-220-2.
3. Принято, что АЭС работают в базисной части графика нагрузки и не участвуют в регулировании частоты энергосистемы в режимах ее понижения. В связи с этим работа

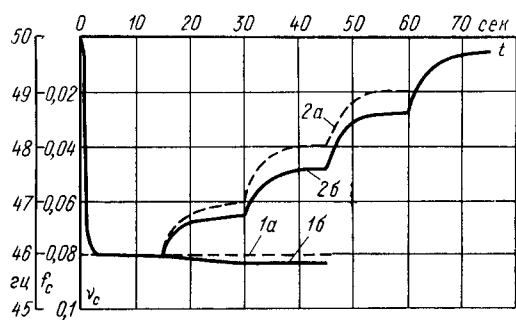


Рис. 1. Кривые изменения частоты системы.
1 — без АЧР-II; 2 — с АЧР-II; а — при $P_T = 0$; б — при $P_T \neq 0$; 2а — также при $P_T \neq 0$, но с учетом компенсации снижения мощности АЭС.

регулятора скорости турбины не рассматривается.

4. Регулирующий эффект нагрузки по частоте с учетом снижения напряжения $k_{p,э}$ принят равным двум.

5. Напряжение на шинах питания собственных нужд принято неизменным.

6. Давление в конденсаторе принято неизменным $\varphi_z = 0$.

7. Расчеты по определению предельных частотно-временных зависимостей проведены исходя из условий, соответствующих наиболее тяжелому режиму работы блоков АЭС с точки зрения резерва по подаче питательной воды, поэтому не учтены запас по производительности рабочих ПЭН, не превышающий 5—10%, и работа АВР.

8. Уравнения, описывающие процессы в реакторе и первичном контуре, приведены с учетом общепринятых допущений [Л. 2 и 3].

9. Работа АЧР-II воспроизводилась уменьшением в процессе расчета аварийного дефицита условно в четыре укрупненные очереди через $\Delta t = 15$ сек, начиная с $t = 15$ сек.

Система уравнений, составляющих математическую модель исследуемых процессов, в относительных изменениях имеет следующий вид:

уравнение динамики энергосистемы

$$T_{je}(1 + \nu_c) \frac{d\nu_c}{dt} = -\Delta P_{\text{деф}} - k_{p,э} \nu_c + k_{\text{АЭС}} P_T - k_{\text{АЧР-I}} (\nu_c - \nu_{\text{АЧР-I}}) - k_{\text{АЧР-II}} (t - t_{\text{АЧР-II}}), \quad (1)$$

где

$$k_{\text{АЧР-I}} = \begin{cases} 0 & \text{при } \nu_c > \nu_{\text{АЧР-I}}; \\ k_{\text{АЧР-I}} & \text{при } \nu_c \leq \nu_{\text{АЧР-I}}; \end{cases}$$

$$k_{\text{АЧР-II}} = \begin{cases} 0 & \text{при } t < t_{\text{АЧР-II}}; \\ k_{\text{АЧР-II}} & \text{при } t \geq t_{\text{АЧР-II}}; \end{cases} \quad t_{\text{АЧР-II}} = F(\nu_{c, \text{зав}});$$

$$P_T = \begin{cases} 0 & \text{при } t < t_3; \\ P_T & \text{при } t \geq t_3. \end{cases}$$

уравнения турбины:

$$P_T = D_T + \alpha_{n,э} (\theta_s - \varphi_z); \quad (2)$$

$$D_T = \mu_T + \theta_s; \quad (3)$$

$$\frac{d\mu_T}{dt} = r_1 \theta_s + r_2 \frac{d\theta_s}{dt}; \quad (4)$$

уравнения парогенератора:

$$T_h \frac{dh}{dt} = G_{n,э} - D_T; \quad (5)$$

$$T'_{nT} \frac{d\theta_s}{dt} = \alpha_{1nT} \theta_{cp,nT} - \alpha_{2nT} \theta_s - \alpha_{3nT} D_T; \quad (6)$$

$$\alpha_{4nT} \theta_{вх,nT} - \alpha_{5nT} \theta_{cp,nT} + \alpha_{6nT} G_{TH} = \alpha_{7nT} \theta_{cp,nT} - \alpha_{8nT} \theta_s \quad (7)$$

или

$$\theta_{cp,nT} = \alpha'_{4nT} \theta_{вх,nT} + \alpha'_{6nT} G_{TH} + \alpha'_{8nT} \theta_s; \quad (7a)$$

уравнения реакторного контура:

$$N = \frac{1}{\beta} \delta k + C; \quad (8)$$

$$\frac{dC}{dt} = \lambda (N - C); \quad (9)$$

$$T'_{y} \frac{d\theta_y}{dt} = N - W; \quad (10)$$

$$W = \alpha_{1y} \theta_y - \alpha_{1p} \theta_{cp,p}; \quad (11)$$

$$T'_{p} \frac{d\theta_{cp,p}}{dt} = W - (\alpha_{2p} \theta_{cp,p} - \alpha_{3p} \theta_{вх,p} + \alpha_{4p} G_{TH}); \quad (12)$$

$$\theta_{вх,p} = \alpha_{5p} \theta_{cp,p} - \alpha_{6p} \theta_{вх,p}; \quad (13)$$

$$\delta k = \rho'_{APz} - \rho'_{y\theta_y} - \rho'_{\theta_{cp,p}}; \quad (14)$$

$$\frac{dz}{dt} = -r_3 \theta_{вх,p} - r_4 \frac{d\theta_{вх,p}}{dt}; \quad (15)$$

$$G_{TH} = \alpha_{7p} \nu_c; \quad (16)$$

$$T_{\tau} \frac{d\theta_{вх,пг}}{dt} = \alpha_{8p} \theta_{cp,p} - \alpha_{9p} \theta_{вх,p} - \alpha_{9пг} \theta_{вх,пг}; \quad (17)$$

$$T_{\tau} \frac{d\theta_{вх,p}}{dt} = \alpha_{10пг} \theta_{cp,пг} - \alpha_{11пг} \theta_{вх,пг} - \alpha_{10p} \theta_{вх,p}; \quad (18)$$

Уравнения контура питательной воды:

$$T_{ju}(1 + \nu_n) \frac{d\nu_n}{dt} = P_{п,э} - P_{п,м}; \quad (19)$$

$$P_{п,э} = \frac{1 - s_0}{s_0} \left(\frac{\nu_c - \nu_n}{1 + \nu_c} \right); \quad (20)$$

$$P_{п,м} = G_{п,м} + 2\nu_n + 2\nu_n G_{п,м}; \quad (21)$$

$$G_{п,м} + k_1 G_{п,м}^2 + k_2 G_{п,м} \nu_n = k_3 \nu_n + k_4 \nu_n^2. \quad (22)$$

Приведенная система уравнений была смоделирована на АВМ, и были произведены расчеты при возмущении в виде дефицита мощности в энергосистеме для различных его значений. Расчеты проводились с учетом и без учета срабатывания очередей АЧР-II. Для оценки влияния изменения мощности турбины в некоторых расчетах последняя принималась неизменной ($P_T = 0$).

По результатам расчетов построены зависимости основных параметров, представляющих интерес для анализа исследуемых режимов.

На рис. 1 и 2 приведены зависимости ν_c , N , P_T от времени при дефиците мощности $\Delta P_{\text{деф}} = 0,5 P_{\text{н.с.}}$.

Из анализа результатов расчетов следует, что с начала возмущения происходит снижение нейтронной мощности реактора, однако из-за инерционности промежуточных звеньев мощность турбины и соответствующая ей электрическая мощность начинают снижаться только через 10—15 сек с момента возмущения. К этому времени частота в энергосистеме из-за срабатывания очередей АЧР-I и регулирующего эффекта нагрузки уже зависит от нижнего для данного дефицита уровня ($\nu_{\text{зав}} = 46$ гц). В этих условиях средняя скорость снижения мощности турбины равна 0,1 %/сек. Снижение мощности происходит из-за уменьшения производительности ГЦН, зависимость которых от частоты вследствие отсутствия статического противодавления носит прямолинейный характер с коэффициентом статизма, близким к единице. Такие характеристики ГЦН приводят к снижению расхода теплоносителя на 8—10% (рис. 3) и соответственно мощности турбины на 4—5% при зависимости частоты на $\nu_{\text{зав}} = 46—45$ гц.

При срабатывании очередей АЧР-II, выбранных из условий компенсации только регулирующего эффекта нагрузки, восстановление частоты происходит с запаздыванием; в рассматриваемом случае каждая очередь поднимает частоту до величины, меньшей расчетной на 0,3—0,4 гц, что видно из

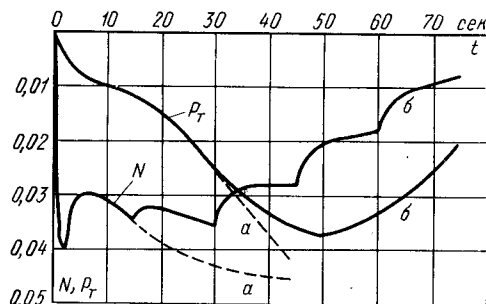


Рис. 2. Кривые изменения нейтронной мощности реактора N и мощности турбины P_T .
а — без АЧР-II; б — с АЧР-II.

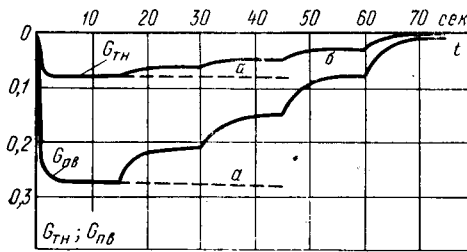


Рис. 3. Кривые изменения расходов теплоносителя (G_{TH}) и питательной воды ($G_{п.в.}$).
а — без АЧР-II; б — с АЧР-II.

сопоставления кривых, снятых при $P_T=0$ и $P_T \neq 0$ (рис. 1).

Для выбора уставок времени АЧР-II построена номограмма (рис. 4), на которой приведены динамические характеристики производимости ПЭИ и срабатывания уровня воды в парогенераторе при различных дефицитах.

Из кривых $h=F(t)$ видно, что в случае $P_T \neq 0$, т. е. в реальных условиях, срабатывание уровня воды в парогенераторе происходит быстрее, чем при $P_T=0$. Это объясняется более низким (на 4–5%) уровнем зависания частоты. Кривые, представленные на номограмме, с достаточной для инженерных расчетов точностью могут быть построены по следующим расчетным выражениям:

$$v_{с.зав} = - \frac{\Delta P_{деф} - k_{АЧР-I} v_{АЧР-I}}{k_{р.э} + k_{АЧР-I}}; \quad (23)$$

$$G_{п.в.} = \frac{-(1+k_2 v_c) + \sqrt{(1+k_2 v_c)^2 + 4k_1 v_c (k_3 + k_4 v_c)}}{2k_1}, \quad (24)$$

где

$$k_1 = \frac{1 - (a_2 + p_{ср})}{a_1 + 2(a_0 - p_{ср})}; \quad k_2 = - \frac{a_1}{a_1 + 2(a_0 - p_{ср})};$$

$$k_3 = \frac{2a_0 + a_1}{a_1 + 2(a_0 - p_{ср})}; \quad k_4 = \frac{a_0}{a_1 + 2(a_0 - p_{ср})};$$

(здесь a_0, a_1, a_2 — коэффициенты полинома, соответствующие начальной точке, точке экстремума и точке номинальных значений расхода и напора QH -характеристики насоса);

$$t_{ср.пр} = \frac{hT_h}{G_{п.в.} - D_T}, \quad h = -1, \quad D_T = 0. \quad (25)$$

Уставки времени АЧР-II должны быть выбраны таким образом, чтобы уровень воды в парогенераторе не снизился ниже допустимого. Выбор уставок производится в следующей последовательности: задавшись значениями аварийного дефицита, дефицитов, действующих в дискретные моменты времени, соответствующие уставкам АЧР-II, определяется время срабатывания уровня воды в парогенераторе до критического; строятся характеристики $h=F(t)$ при соответствующих значениях $v_{с.зав}$. По полученным характеристикам, задаваясь уставками времени АЧР-II строится фактическая характеристика срабатывания уровня (пунктирная линия 1–2–3–4). При правильном выборе уставок построенная характеристика не должна пересекать ось абсцисс.

Таким образом, на АЭС, так же как и на ТЭС, уменьшение генерирующей мощности при аварийном снижении частоты может произойти скачком из-за срабатывания уровня воды в парогенераторе. В то же время в отличие от ТЭС на блоках АЭС имеет место и постепенное снижение мощности турбины, происходящее с запаздыванием по отношению к частотно-временной характеристике. Указанное обстоятельство необходимо учитывать при выборе значения отключаемой мощности потребителей от очередей АЧР-II.

В связи с тем, что очереди АЧР-II начинают срабатывать только через 10–15 сек с момента возникновения дефицита, а за это время электрическая мощность еще не успевает снизиться, то создается ложное впечатление зависания частоты. Фактически же с этого момента частота снова начинает «ползти вниз», приводя к снижению уровня ее зависания.

При восстановлении частоты эффект снижения мощности сказывается значительно больше: срабатывание очередей АЧР-II не восстанавливает частоту до уровня, рассчитанного из условия компенсации регулирующего эффекта нагрузки на 30–40% (рис. 1). Для обеспечения восстановления частоты

за заданный промежуток времени необходимо выбирать уставки АЧР-II с учетом скорости снижения генерирующей мощности $\left(\frac{dP_T}{dt}\right)$.

Резюмируя сказанное, можно рекомендовать выбранные уставки АЧР-II проверять по номограмме из условия несрабатывания уровня в парогенераторе АЭС. При определении плотности АЧР-II по времени ($k_{АЧР-II}$) необходимо учитывать снижение мощности АЭС при снижении частоты по выражению:

$$k_{АЧР-II} = \frac{dP_{АЧР-II}}{dt} = \frac{dP_T}{dt} k_{АЭС} - \left(\frac{df}{dt}\right)_{\text{вос}} \frac{dP_{\Sigma \text{н.с}}}{df}, \quad (26)$$

где $\left(\frac{df}{dt}\right)_{\text{вос}}$ определяется по номограмме, а $\frac{dP_T}{dt}$ — по результатам решения системы уравнений (1) — (22); в приближенных

расчетах в течение времени до 45 сек можно принять $\frac{dP_T}{dt} \approx$

$\approx -0,1\% \text{ сек}$, имея в виду, что мощность турбины и соответствующая ей электрическая мощность начинают снижаться только через 10–15 сек и до $t=45 \text{ сек}$ изменяются почти по прямолинейному закону с коэффициентом статизма $k_{ср} \approx \approx 0,1\% \text{ сек}$. Дальнейший расчет ($t_{АЧР-II} \geq 45 \text{ сек}$) можн

вести при $\frac{dP_T}{dt}=0$, так как после $t=45 \text{ сек}$ электрическая

мощность АЭС начинает возрастать и селективность будет обеспечена за счет выдержек времени очередей АЧР-II.

В качестве примера в указанной последовательности произведен выбор уставок АЧР-II для рассмотренного случая при дефиците мощности $\Delta P_{деф}=0,5 P_{\Sigma \text{н.с}}$. По номограмме определены уставки времени АЧР-II: I очередь—15 сек, II очередь—30 сек, III очередь—45 сек, IV очередь—60 сек. (Принятие большего числа очередей принципиально не меняет хода расчета, так как определяющим являются граничные времена действия АЧР-II.) При этом скорость восстановления частоты с 46 до 49 гц

$$\left(\frac{df}{dt}\right)_{\text{вос}} = \frac{6}{45} = 0,133\% \text{ сек}.$$

Приняв $\frac{dP_T}{dt} = -0,1\% \text{ сек}$ и регулирующий эффект на

грузки $\frac{dP_{\Sigma \text{н.с}}}{df} = 2$, из выражения (26) получим:

$$k_{АЧР-II} = \frac{dP_{АЧР-II}}{dt} \approx -0,32\% \text{ сек}.$$

Тогда в сумме от очередей с $t_{АЧР-II} < 45 \text{ сек}$ отключается 9,6% мощности нагрузки против 8% при неучете постепенного снижения мощности АЭС, т. е. в последнем случае восстановление частоты произойдет за большее время, что может привести к срабатыванию уровня воды в парогенераторе.

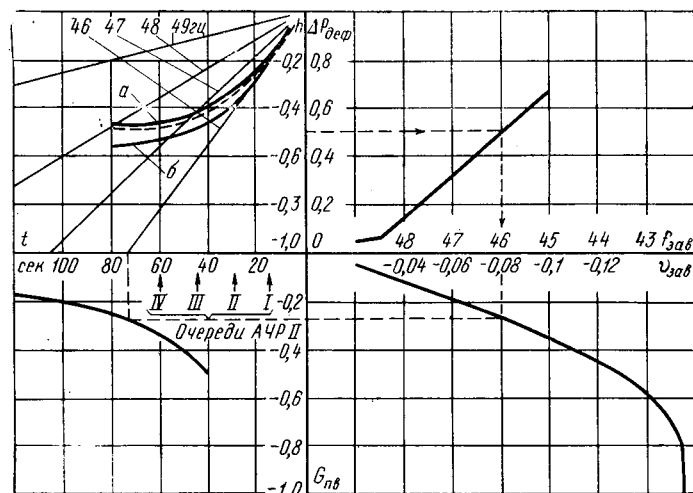


Рис. 4. Номограмма для выбора уставок АЧР-II.
а — при $P_T=0$; б — при $P_T \neq 0$.

Как показали проведенные расчеты на АВМ, при выборе уставок АЧР-II по изложенной методике обеспечивается заданная скорость восстановления частоты (рис. 1).

Выводы. 1. Составлена математическая модель для исследования процессов в энергосистемах с атомными электростанциями при возникновении дефицита мощности, сопровождающегося снижением частоты и работой АЧР.

2. Система уравнений, описывающих исследуемые процессы, смоделирована и решена на АВМ. В результате расчетов получены кривые зависимостей различных параметров от частоты и времени с учетом работы АЧР первой и второй категорий.

3. Предложена номограмма, по которой могут быть проверены и уточнены уставки времени АЧР-II.

4. Даны расчетные выражения, по которым определяется плотность по времени отключения потребителей от АЧР-II с учетом компенсации снижения мощности АЭС при снижении частоты системы.

5. Настоящие исследования целесообразно продолжить в направлении выявления возможности участия АЭС в регулировании частоты и мощности в системе, а также мобилизации энергоблоков АЭС с точки зрения «подхвата» нагрузки, что позволит снизить отключаемую АЧР нагрузку за счет большей мобилизации резерва мощности.

Примечание. В расчетах приняты следующие коэффициенты и начальные параметры: $T_{j0}=6$ сек; $k_{AЧР-I}=6,8$; $k_{AЧР-II}=-0,32$ %/сек; $v_{AЧР-I}=-0,03$; $t_3=15$ сек; $a_{п.з}=0,036$; $\beta=0,0072$; $\lambda=0,085$; $r_1=3,33$; $r_2=33$; $r_3=0,48$; $r_4=1,2$; $a_{1пг}=1,1$; $a_{2пг}=a_{3пг}=1$; $a_{3пг}=0,082$; $a_{4пг}=1,36$; $a_{5пг}=1,28$; $a_{6пг}=0,068$; $a_{7пг}=0,95$; $a_{8пг}=0,865$; $a_{10пг}=1,9$; $a_{11пг}=1,11$; $a_{4пг}'=0,61$; $a_{6пг}'=0,03$; $a_{8пг}'=0,39$; $a_{1пг}'=1,65$; $a_{1пг}'=0,65$; $a_{2пг}'=18,4$; $a_{3пг}'=17,4$; $a_{4пг}'=0,97$; $a_{5пг}'=a_{8пг}'=1,9$; $a_{6пг}'=a_{9пг}'=0,9$; $a_{7пг}'=a_{10пг}'=1$; $\rho_{AЧР-I}=0,015$; $\rho_{AЧР-II}'=0,019$; $\rho_{9пг}'=0,085$; $T_{пг}'=38,5$ сек; $T_{г}'=7,1$ сек; $T_{пг}'=6,2$ сек; $T_{жп}=2,5$ сек; $s_0=0,02$; $a_0=1$; $a_1=0,21$; $a_2=-0,21$; $\rho_{с.т.}=0,73$; $k_1=0,64$; $k_2=-0,28$; $k_3=2,95$; $k_4=1,33$.

Принятые обозначения:

v_c, v_n — частота сети и питательных насосов;

$P_t, N, W, P_{п.з.}, P_{п.м.}$ — мощности соответственно турбины,

реактора (нейтронная и тепловая), питательных насосов (электрическая и механическая);

$D_t, G_{п.з.}, G_{тн}$ — расходы соответственно пара на турбину, питательной воды и теплоносителя;

$\theta_y, \theta_{вх.р.}, \theta_{вых.р.}, \theta_{ср.р.}, \theta_{вх.пг.}, \theta_{ср.пг.}, \theta_s$ — температуры соответственно уранового топлива в реакторе; теплоносителя на входе и выходе реактора и средняя; на входе парогенератора и средняя; насыщенного пара из парогенератора;

μ_t, z — открытие клапанов турбины и перемещение касет автоматического регулирования реактора;

$C, \delta k$ — соответственно концентрация ядер-излучателей запаздывающих нейтронов и реактивность реактора;

h — максимально допустимое отклонение уровня воды в парогенераторе. (Все вышеприведенные обозначения соответствуют относительным изменениям параметров.);

$\Delta P_{деф.}, P_{\Sigma н.с.}, P_{AЧР-II}$ — соответственно аварийный дефицит активной мощности, суммарная мощность нагрузки системы отключаемая мощность в каждой очереди АЧР-II, о. е.;

$v_{AЧР-I}, t_{AЧР-II}$ — начальные уставки срабатывания по частоте для АЧР-I и по времени для АЧР-II;

$k_{AЧР-I}, k_{AЧР-II}$ — плотность АЧР-I по частоте и АЧР-II по времени;

t_3 — время запаздывания снижения мощности станции;

$T_{j0}, T_{жп}, T_h$ — эквивалентные механические постоянные инерции системы и питательных насосов; динамическая постоянная времени парогенератора по уровню;

$T_{пг.}, T_{г.}, T_{пг.}', \tau_r, \tau_x$ — постоянные времени инерционных звеньев контура реактор-парогенератор;

α, ρ', r, k, s_0 — постоянные коэффициенты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методические указания по автоматической частотной разгрузке (АЧР). М., СЦНТИ ОРГРЭС, 1972.

2. Шульц М. А. Регулирование энергетических ядерных реакторов. М., Изд-во иностр. лит., 1957.

3. Сергеев В. Л. Аналоговое моделирование судовых ядерных паропроизводящих установок. М.—Л., «Судостроение», 1971.

[15.5.1974]

УДК 62-83:62-503.53

Одно- и двухкаскадная релейные следящие системы с быстройдействующими электромагнитными муфтами

Канд. техн. наук ТОКАРЕВА В. Д.

Москва

В некоторых станках с числовым программным управлением, а также в копировальных станках привод подачи представляет собой следящую систему с быстройдействующими электромагнитными муфтами. В этих системах рабочий винт станка приводится в движение посредством электромагнитной муфты от силового привода, который является либо системой автоматического регулирования скорости, либо нерегулируемым приводом от асинхронного двигателя.

В следящей системе подачи с регулируемым приводом муфты (двухкаскадная следящая система) задание программы работы получает одновременно как следящая система подачи, так и привод ведущего вала муфты. Это позволяет поддерживать желаемый уровень превышения скорости привода муфты над заданной скоростью входного воздействия.

В таких системах скорость муфты с изменением скорости подачи может поддерживаться на 10—20% выше заданной. В следящей системе с нерегулируемым приводом муфты (однокаскадная следящая система), когда скорость двигателя муфты в процессе работы остается неизменной, разница в скоростях привода муфты и привода подачи (задающей) может составлять уже значительно большую величину. Таким образом, одно- и двухкаскадные следящие системы могут быть охарактеризованы так называемым коэффициентом превышения скорости $k_{пг.}$, показывающим, во сколько раз скорость двигателя привода муфты превышает заданную. Для двухкаскадной системы $k_{пг.}=1,1-1,25$, а для однокаскадных систем этот коэффициент может достигать нескольких единиц.

В статье рассматривается динамическая точность одно- и двухкаскадного следящих приводов подачи. Анализируется

зависимость рассогласования следящей системы в период установившегося движения (скоростная ошибка) и при скачке входного воздействия (динамическая ошибка) от уровня превышения скорости привода муфты над заданной (т. е. от коэффициента превышения скорости). Система анализируется при работе на одной координате, отсутствии люфтов и упругости.

Установившаяся работа системы характеризуется автоколебательным режимом, когда исполнительная ось то отстает, то опережает задающую. Рассогласование определяется соответственно ошибками периодов отставания и опережения [Л. 1 и 2].

Ошибка периода отставания $\delta_{от}$ от коэффициента превышения скорости не зависит, поэтому для обеих систем $\delta_{от}$ при неизменных параметрах и скорости подачи остается неизменной.

Рассогласование периода опережения $\delta_{оп}$ состоит из двух составляющих [Л. 3] — ошибки запаздывания при отключении $\delta_{з.о.}$ и ошибки торможения $\delta_{т.}$

Ошибка торможения имеет нелинейную зависимость от скорости входного воздействия, коэффициента превышения, нагрузки и параметров муфты. Эта ошибка для регулируемого привода при $k_{пг.}=1,2$ практически равна нулю на всем диапазоне рабочих скоростей подачи ($v_{вх.} \leq 600$ мм/мин); для нерегулируемого привода при небольших скоростях (до 200 мм/мин) ошибка торможения также невелика. Однако с увеличением как скорости подачи, так и коэффициента превышения скорости ошибка торможения значительно возрастает. Таким образом, ошибка периода опережения, являясь нели-

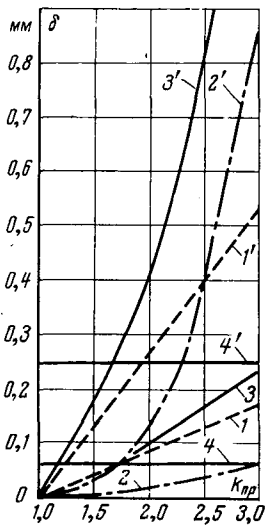


Рис. 1. Рассогласование системы за период автоколебаний.

1 и 1' — $\delta_{з.о.}$; 2 и 2' — $\delta_{т.}$; 3 и 3' — $\delta_{от.}$; 4 и 4' — $\delta_{оп.}$; 1—4 — при скорости подачи 200 мм/мин; 1'—4' — при 600 мм/мин.

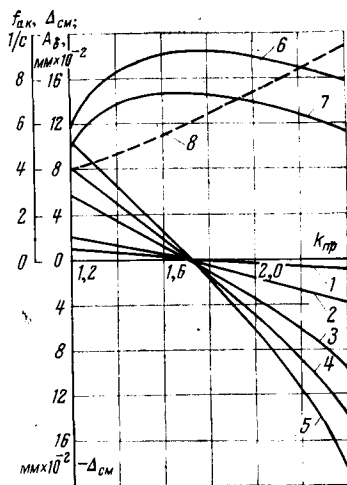


Рис. 2. Параметры автоколебания.

1—5 — смещение центра автоколебаний $\Delta_{см}$ соответственно для 100, 200, 400, 500 и 600 мм/мин; 6 — частота автоколебаний $f_{ак}$ при 300 мм/мин; 7 — то же при 600 мм/мин; 8 — размах автоколебаний A_z при 200 мм/мин.

нейной функцией скорости, параметров муфты, системы и нагрузки, также нелинейно зависит от коэффициента превышения скорости.

На рис. 1 приведены зависимости ошибок отставания и опережения от коэффициента превышения скорости при двух скоростях входного воздействия. Там же даны составляющие ошибки опережения. Из рисунка видно, что для однокаскадной системы основной составляющей является ошибка периода опережения $\delta_{оп.}$, а для двухкаскадной — ошибка при отставании $\delta_{от.}$.

Параметры автоколебания — размах, смещения центра и период, — характеризующие динамическую точность релейной следящей системы [Л. 2], имеют следующую зависимость от $k_{пр.}$

Размах автоколебаний, являющийся составляющей ошибки при отставании и опережении, имеет нелинейную зависимость от коэффициента превышения скорости, параметров муфты, нагрузки и скорости подачи. Он увеличивается с ростом коэффициента превышения и для систем с нерегулируемым приводом достигает большой величины (рис. 2, кривая 8).

Для двухкаскадной системы смещение центра автоколебаний является величиной положительной; для однокаскадных систем знак смещения меняется на отрицательный (рис. 2).

Значение коэффициента превышения скорости, соответствующее нулевому смещению, практически не зависит от скорости, так как время запаздывания при включении и при отключении также от нее не зависит, а время отсечки и торможения с изменением скорости меняется в равной мере. Таким образом, с достаточной степенью точности можно принять, что для любой скорости входного воздействия нулевое смещение будет одним и тем же (рис. 2). При увеличении нагрузки или момента тормозной муфты нулевое смещение «перемещается» в сторону больших коэффициентов превышения скорости. Увеличение момента рабочей муфты приводит к уменьшению $k_{пр.}$. Изменение постоянной времени муфты сказывается на значении $k_{пр.}$. Таким образом, для двухкаскадных систем нулевое смещение — положительная величина для различных рабочих скоростей подачи; для однокаскадных систем по мере роста $k_{пр.}$ нулевое смещение переходит в область отрицательных значений (рис. 2).

Частота автоколебаний определяется периодами отставания и опережения, которые имеют нелинейную зависимость от скорости, коэффициента превышения этой скорости, параметров муфты и нагрузки [Л. 2]. Причем нулевому смещению соответствует максимальная частота автоколебаний (рис. 2, кривые 6 и 7).

Характер движения выходной оси $S_{вых}$ при постоянной скорости входного воздействия и различных коэффициентах превышения скорости показан на рис. 3. Здесь же показаны составляющие ошибки $\delta_{от.}$ и $\delta_{оп.}$, время этих периодов, а также параметры автоколебаний: размах A_z , смещение центра $\Delta_{см}$ и период $T_{ак.}$. Установившийся автоколебательный режим системы может быть двух типов. Двухзонный тип характеризуется включением и отключением муфты одного направления ($+i_B$) (рис. 3, а). При трехзонном типе автоколебаний в процессе движения системы происходит переключение двух реверсивных муфт ($\pm i_B$) (рис. 3, б). Наличие того или иного типа автоколебаний определяется соотношением величины рассогласования системы в период опережения исполнительской оси $\delta_{оп.}$ и размером зоны нечувствительности релейного элемента рассогласования. Условие существования двухзонного типа автоколебания

$$\delta_{о.} \geq \frac{\delta_{з.о.} + \delta_{т.}}{2}.$$

Границы областей двух- и трехзонного типа автоколебания при работе на различных скоростях подачи и при изменении уровня превышения скорости приводом муфты даны на рис. 4.

Трехзонный тип автоколебаний характеризуется увеличением ошибки системы. На рис. 5, а приведена осциллограмма, снятая на опытном станке при наличии трехзонного типа автоколебаний; здесь происходит переключение тока управления муфт обоих направлений. Рассогласование системы при этом значительно возрастает. На рис. 5, б для сравнения приведена осциллограмма, снятая при той же скорости работы системы, но при переключении муфты лишь одного направления (двухзонный тип автоколебаний). Рассогласование системы здесь может обеспечить двухзонный тип автоколебаний либо при увеличении зоны нечувствительности δ_0 релейного элемента, либо при работе на малых скоростях подачи и при небольшом коэффициенте превышения скорости муфты или же при наличии несимметричной характеристики релейного элемента.

Для двухкаскадной следящей системы двухзонный тип автоколебаний будет иметь место при весьма малой величине зоны нечувствительности релейного элемента рассогласования (рис. 4), поэтому для двухкаскадных систем возможно иметь в качестве релейной симметричную характеристику, которая, кроме простоты исполнения, позволяет улучшить характеристики системы при торможении.

Для однокаскадной следящей системы при работе на больших скоростях подачи во избежание трехзонного типа автоколебаний и нежелании значительно увеличивать зону нечувствительности релейного элемента, необходимо иметь несимметричную релейную характеристику.

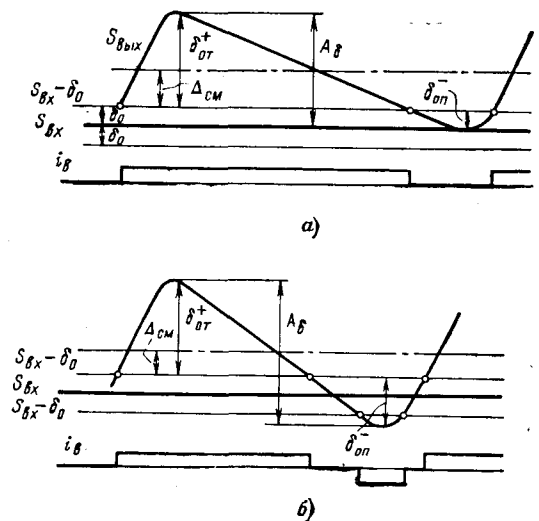


Рис. 3. Характер движения выходной оси системы, составляющие ошибки и параметры автоколебания.

а — при $k_{пр} = 1,2$; б — при $k_{пр} = 1,4$.

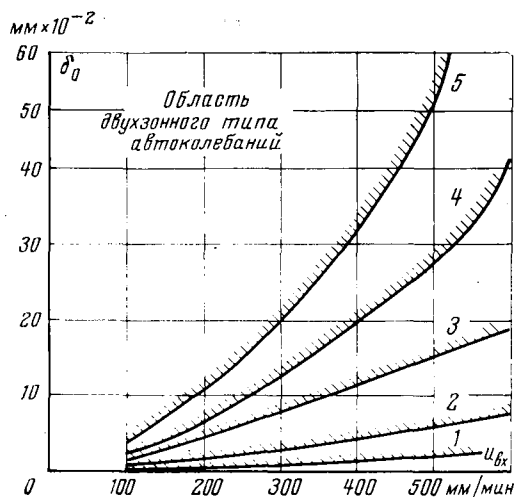


Рис. 4. Граница области двух- и трехзонного типа автоколебаний.

1 — $k_{пр}=1,2$; 2 — $k_{пр}=1,5$; 3 — $k_{пр}=2,0$; 4 — $k_{пр}=2,5$; 5 — $k_{пр}=3,0$.

Неустановившийся режим работы характеризуется значительным увеличением как ошибки, так и ее периода. Факторами, влияющими на рост пусковой ошибки, являются увеличение скорости подачи и уменьшение быстродействия привода муфты.

Улучшение точности системы в режиме пуска путем повышения коэффициента превышения скорости привода муфты противоречит требованиям установившегося режима работы системы, поэтому для уменьшения пусковой ошибки, кроме повышения быстродействия системы регулируемого привода муфты, может быть рекомендован ступенчатый пуск (рис. 5, в).

Влияние коэффициента превышения скорости на ошибку системы как при пуске, так и в режиме установившихся автоколебаний можно увидеть на фазовом портрете (в статье не приводится), снятом на ЦВМ в координатах «скорость — рассогласование». Для двухкаскадной системы ($k_{пр}=1,2$) пусковая ошибка больше установившейся, а для однокаскадной системы ($k_{пр}=2$) ошибка при пуске почти совпадает с ошибкой в установившемся режиме, которая для этой системы выше установившейся ошибки двухкаскадной системы (при одной и той же скорости подачи, равной 225 мм/мин).

Расчет системы и эксперименты проводились для системы с моментом муфты $M=4$ кгс·м и постоянными времени 0,028 сек (включение), 0,018 сек (отключение). Динамическая добротность 3000 сек².

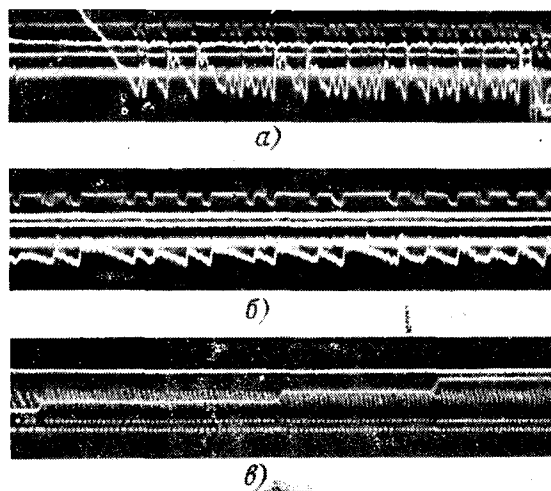


Рис. 5. Оциллограммы рассогласования системы при пуске в режиме установившихся автоколебаний при скорости 600 мм/мин.

Выводы 1. В однокаскадных системах (с нерегулируемым приводом муфты) для получения приемлемой точности следует работать в зоне низких скоростей подачи и при несимметричной релейной характеристике рассогласования.

2. Введение регулирования скорости привода муфты (двухкаскадная следящая система) позволяет расширить диапазон рабочих скоростей, иметь симметричную релейную характеристику, уменьшить ошибку при торможении системы.

3. Для уменьшения пусковой ошибки в двухкаскадных следящих системах следует либо увеличивать быстродействие системы регулирования скорости муфты, либо вводить ступенчатый пуск.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Токарева В. Д. Переходные режимы следящего привода подачи станка с программным управлением. — «Электротехника», 1969, № 3.
2. Токарева В. Д. Динамическая точность релейной следящей системы с быстродействующими электромагнитными муфтами. — «Электричество», 1970, № 10.

[18.1.1974]



К определению колебаний электрической нагрузки (Статья Куренного Э. Г., «Электричество», 1972, № 2)

Канд. техн. наук КУНИН Р. З.

Ленинград

В обсуждаемой статье [Л. 1] предлагается метод расчета колебаний электрической нагрузки, причем в тексте статьи даются ссылки на [Л. 2]. Некоторые положения [Л. 2] Куренного Э. Г. использует и в других своих статьях [Л. 3 и 4], развивая их или же ссылаясь на [Л. 2]. Таким образом, при ознакомлении с методом [Л. 1] возникает потребность в разборе идей, впервые выдвинутых в [Л. 2] и развернутых далее в [Л. 3 и 4].

Прежде всего остановимся на критике метода Айере. В [Л. 4] утверждается, что установленная в [Л. 2] принципиальная неточность этого метода делает его применение необоснованным. Такое утверждение основывается в [Л. 2 и 3] на положении о том, что напряжения, большие или меньшие номинального U_n на одно и то же значение, по критерию Айере равноценны («одинаковы», как отмечается в [Л. 3]), хотя технико-экономические последствия от понижения и повышения напряжения на одно и то же значение различны.

Действительно, для графиков напряжений, превышающих или меньших U_n на одно и то же значение, критерий Айере [Л. 5—8] *

$$N = \frac{10000}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} [u(t)]^2 dt, \quad (1)$$

где $u(t) = \frac{U(t) - U_n}{U_n}$; $U(t)$ — напряжение в момент t , имеет

одно и то же значение. Однако критерий Айере обычно применяется в сочетании с другим интегральным параметром — средним отклонением напряжения \bar{v} от номинального U_n за период времени T :

$$\bar{v} = \frac{100}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} u(t) dt, \quad (3)$$

который для указанных случаев (напряжение больше или меньше номинального на одно и то же значение) по абсолютной величине одинаков, но противоположен по знаку. Различие в знаках позволяет учитывать различные технико-экономические последствия от понижения или повышения напряжения. Что касается термина «неодинаковость» напряжения, то его следует понимать в том смысле, на сколько реальный график напряжения «неодинаков», расходитсся с U_n : чем больше величина N , тем больше график напряжения отклоняется от U_n , тем хуже качество напряжения. Таким образом, утверждение [Л. 2—4] об одинаковости для метода Айере напряжений, меньших или больших номинального на одну и ту же величину, связано с игнорированием параметра \bar{v} и его знака, что недопустимо; вследствие этого нельзя согласиться с выводами [Л. 3 и 4] о принципиальной невозможности оценки качества напряжения с помощью метода Айере.

В литературе отмечалось, что метод Айере был разработан [Л. 5] для распределительных сетей и поэтому имеет ограниченную область применения. Цель, которая преследуется установкой в сети интегрирующего вольтметра, заключается в том [Л. 7], чтобы дать возможность работникам эксплуатации быстро определить параметры, характеризующие приближенно качество напряжения у потребителей, и оценить необходимость и эффективность применения различных средств для регулирования напряжения. В [Л. 8] показано, что метод Айере может найти применение для распределительных сетей,

питающих промышленные предприятия, и для сетей самих предприятий при наличии однородных потребителей, электроустановки которых допускают в известных пределах отклонения напряжения; для электроустановок, требующих сохранения постоянства величины тока или стабильности напряжения, интегральный критерий не может быть использован. Таким образом, критика в [Л. 2—4] метода Айере несостоятельна.

Отметим, что статистические приборы для измерения «неодинаковости» напряжения и средней величины отклонения напряжения в СССР не изготавливаются. Для оценки качества напряжения серийно выпускается Рижским опытным заводом Главлатэнерго статистический прибор типа САКН, позволяющий получить восьмиступенчатую гистограмму отклонений напряжения. Использование этого прибора для контроля качества напряжения и для оценки технико-экономического эффекта влияния отклонения напряжения на работу сети и электроприемников позволяет получить [Л. 9] значительно более полную информацию о качестве напряжения по сравнению с характеристиками Айере, получаемыми с помощью прибора [Л. 5] французских специалистов. Однако при резкопеременной нагрузке (типа реверсивно-вентильного привода, дугowych сталеплавильных печей и т. п.) прибор САКН дает значительные погрешности и поэтому практически неприменим.

В [Л. 2—4] предлагается определять отклонение напряжения (обозначаемое ΔU_{θ} в [Л. 3] и ΔU_{θ} или $\Delta U_{\theta}(t)$ в [Л. 4]) как разность среднеквадратичного напряжения (обозначаемого U_{θ} в [Л. 3] и $U_{\theta}(t)$ в [Л. 4]) и номинального напряжения U_n , т. е.

$$\Delta U_{\theta} = U_{\theta} - U_n, \quad (4)$$

где

$$U_{\theta} = \sqrt{\frac{1}{\theta} \int_t^{t+\theta} U^2(t) dt}; \quad (5)$$

$U(t)$ — фактическое значение напряжения в момент t .

Для одних и тех же фактических графиков напряжения параметр U_{θ} незначительно отличается от среднего напряжения за период θ , которое определяется по выражению

$$U_{cp} = \frac{1}{\theta} \int_t^{t+\theta} U(t) dt. \quad (6)$$

В этом можно убедиться на примерах таких теоретических двухступенчатых графиков напряжения, для которых отклонения напряжения заводом больше, чем для реальных графиков. Так, для двухступенчатых графиков со ступенями 360 и 400 в ($\pm 5\%$ U_{cp} , равного $U_n = 380$ в), 310 и 380 в ($\pm 10\%$ U_{cp} , равного 345 в) разница в значениях U_{θ} и U_{cp} составляет всего лишь 0,13 и 0,5% соответственно. Расхождения между значениями U_{θ} и U_{cp} уменьшаются по мере сближения ступеней графиков; продолжительность ступеней практически не влияет на величину расхождений. Таким образом, для практических расчетов вместо выражения (5) вполне приемлемо выражение (6). Так как реальные графики напряжения имеют меньшие отклонения напряжения, чем приведенные двухступенчатые, то можно принять допущение о равенстве U_{θ} и U_{cp} .

Величина U_{cp} не может служить мерой качества напряжения, так как одно и то же ее значение может быть как

* Обозначения приняты согласно [Л. 8].

при высоком, так и при низком качестве напряжения [Л. 6]; например, отклонениям ± 1 и $\pm 10\%$ от U_n соответствует по формуле (6) одно и то же среднее отклонение, равное нулю. Если же отклонения происходят только в одну сторону от U_n (превышения либо уменьшения), величина $U_{\text{ср}}$ ближе к той ступени, значение и продолжительность которой больше; при этом чрезмерные отклонения нивелируются, проходят незамеченными.

Эти свойства присущи как $U_{\text{ср}}$, [так и] $U_{\text{эб}}$; к сожалению, влияние их на оценку качества напряжения в [Л. 2—4] не



Ответ автора

В [Л. 1—4] различаются импульсы, пики, выбросы и колебания (см. также монографию С. Д. Волобрина и др. «Электрические нагрузки промышленных предприятий». Л., «Энергия», 1971). Смещение и непонимание этих понятий привело к появлению заметки Кунина Р. З., содержание которой, за исключением заключительного абзаца (см. ниже), совершенно не относится к колебаниям вообще и к [Л. 1] в частности. Далее приводятся разъяснения положений [Л. 2—4] и работ других авторов по рассматриваемой тематике (см. первое издание упомянутой монографии в 1964 г.). Напомним некоторые из них:

1) работа электроприемников зависит от величины U приложенного напряжения, а не его отклонения ΔU от номинального значения, U_n (момент асинхронного электродвигателя пропорционален U^2 , а не ΔU^2);

2) эффекты воздействия напряжения на сеть и электроприемники проявляются не мгновенно, а за некоторый промежуток времени θ , различный для различных электроприемников ($0 < \theta < \infty$);

3) эффективное (среднеквадратичное) значение $U_{\text{э}}$ напряжения оценивает эти эффекты только в среднем (аналогия: метод эквивалентного тока в электроприводе основан на учете средних потерь в двигателях), а потому не может служить критерием качества; тем более для этой цели нельзя использовать среднее значение $U_{\text{с}}$;

4) с учетом п. 1—3 в [Л. 2—4] предложено оценивать качество напряжения максимумами (пиками) $U_{\text{пб}}$ и минимумами (впадинами — термин и обозначения введены автором позднее) $U_{\text{вб}}$ величины (5) эффективного напряжения $U_{\text{эб}}$ за время θ ;

5) величины пиков (впадин) одного и того же графика напряжения убывают (возрастают) с увеличением их длительности, и только в частном случае при $\theta \rightarrow \infty$ $U_{\text{пб}} \rightarrow U_{\text{э}}$ ($U_{\text{вб}} \rightarrow -U_{\text{э}}$);

6) поскольку принято нормировать отклонения напряжения, то от имеющих наглядный физический смысл (см. п. 1 и 2) величин пиков и впадин приходится переходить к величинам отклонений напряжения за время θ :

$$\Delta U_{\text{пб}} = U_{\text{пб}} - U_n; \Delta U_{\text{вб}} = U_{\text{вб}} - U_n,$$

которые сопоставляются соответственно с наибольшим и наименьшим допустимыми отклонениями в ГОСТ 13109-67 (см. формулы (5) и (6) в [Л. 2]). В силу п. 1 в качестве критерия нельзя брать пики и впадины второго порядка графика отклонений напряжения (формула (4) в [Л. 2]); величины же $\Delta U_{\text{пб}}$ и $\Delta U_{\text{вб}}$ могут быть критериями качества, так как отличаются от $U_{\text{пб}}$ и $U_{\text{вб}}$ лишь на постоянную величину U_n .

Кунин Р. З. приписывает [Л. 2—4] следующие неверные положения: критика критерия Айере, якобы, базируется только на «том, что напряжения, большие или меньшие номинального на одну и ту же величину, равноценны» и будто бы $U_{\text{эб}} = U_{\text{э}}$ и даже $U_{\text{эб}} \approx U_{\text{с}}$.

Первое утверждение противоречит п. 1 и 2, что ясно следует из текста [Л. 2] между формулами (1) и (4). Никаких допущений относительно знака отклонений не делалось, а рис. 1 лишь наглядно иллюстрирует доказываемую в п. 1 и 2 невозможность использования «неодинаковости напряжения». Второе утверждение противоречит п. 2, 4—6. Очевидно, нельзя ставить знак равенства между функцией времени и 0, каковой является $U_{\text{эб}}(t)$ (см. формулу (3) в [Л. 2]), и постоянной величиной $U_{\text{э}}$: например, при $\theta = 0$, когда $U_{\text{эб}}(t) =$

рассматривается. Вследствие указанного предложение [Л. 2—4] о применении параметра $U_{\text{эб}}$ для оценки качества напряжения представляется необоснованным.

В свете изложенного возникает вопрос о необходимости пересмотра ряда положений [Л. 2—4] и корректировки метода [Л. 1]. В заключение следует обратить внимание на то, что предложенный в [Л. 1] метод не иллюстрирован примерами его применения; ничего не говоря об его экспериментальной проверке; не уточняется, универсален ли он, для каких потребителей, графиков нагрузок он предназначен.

$= U(t)$, утверждение Кунина Р. З. приводит к «равенству» $U(t) = U_{\text{э}}(?)$.

Заблуждение же объясняется следующим образом: Кунин Р. З. ошибочно отождествляет величину θ с длительностью T записи графика (теоретически $T \rightarrow \infty$, так что всегда $\theta < T$).

Не удивительно поэтому, что выражение (6), которое согласно (3) из [Л. 2] следует обозначить $U_{\text{с}}(t, \theta)$ или $U_{\text{сб}}(t)$,

приравняется к $U_{\text{с}} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt$. Из рассуждений Кунина

на Р. З. следует лишь, что $U_{\text{э}} \approx U_{\text{с}}$, $U_{\text{эб}}(t) \approx U_{\text{сб}}(t)$: например, для двухступенчатых графиков со ступенями 360 и 400 в, 310 и 380 в в зависимости от θ и «вопреки Кунину Р. З.» продолжительности ступеней расхождения между $U_{\text{эб}}$ и $U_{\text{с}}$, $U_{\text{сб}}$ и $U_{\text{с}}$ могут достигать $\pm 5,5$ и $\pm 10,2\%$, а не $\pm 0,13$ и $\pm 0,5\%$.

Сказанным дается исчерпывающий ответ по существу затронутых вопросов, но не будет излишним показать неприменимость критерия Айере с помощью аргументов самого Кунина Р. З. Несложные преобразования выражений (1) и (3) приводят к формулам:

$$N = 10000 \left(\frac{U_{\text{э}}^2}{U_n^2} - \frac{2U_{\text{с}}}{U_n} + 1 \right); \quad \bar{v} = 100 \left(\frac{U_{\text{с}}}{U_n} - 1 \right).$$

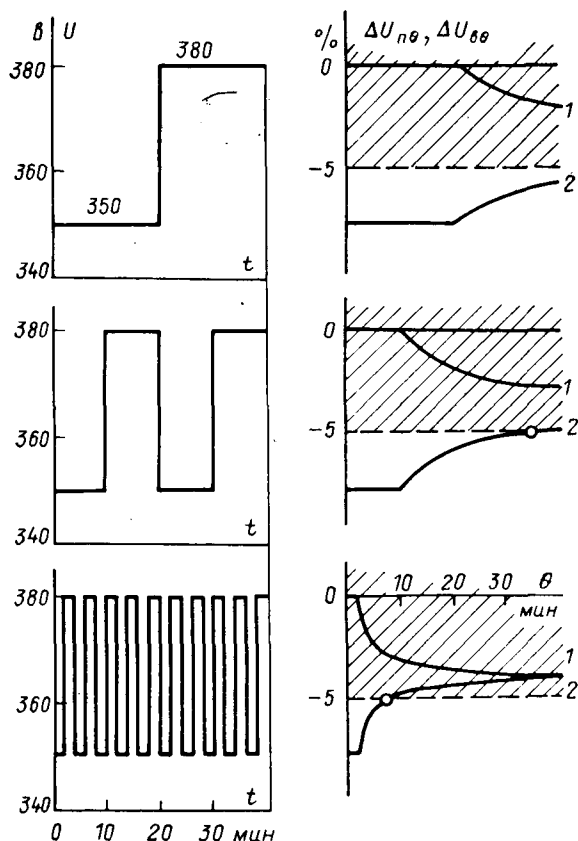
Кунин Р. З., повторяя известные положения (см. п. 3 и условие перехода от пиков эффективных к пикам средних значений в упомянутой монографии), справедливо отмечает, что ни $U_{\text{э}}$, ни $U_{\text{с}}$ не могут служить критериями качества. Совершенно же очевидно, что этот вывод распространяется и на N и \bar{v} , представляющие лишенные физического содержания функциональные преобразования этих же величин.

Следует подчеркнуть, что здесь, как и в [Л. 2—4], речь идет о принципиальной неприменимости критерия Айере, что отнюдь не исключает его использования при необходимости в частных случаях для практических целей. Однако удобство прибора не является доказательством правильности заложенных в нем принципов: при такой аргументации может оказаться удобным вообще отказаться от контроля качества напряжения. Досадно, что контекст ссылки Кунина Р. З. на [Л. 7] невольно умалывает истинное значение этой работы, которая послужила основой для исследований в этой области (см. ссылку на [Л. 7] в [Л. 2]), приведших, например, к созданию ГОСТ 13109-67 на нормы качества электроэнергий.

Непонимание п. 1, 2, 4—6 удобнее всего проиллюстрировать на упоминаемых Куниным Р. З. двухступенчатых графиках. Прежде всего подчеркнем, что существенную роль играют не только величины ступеней таких графиков, но и их длительности: ясно, что одно и то же отклонение больше скажется на электроприемнике, чем дольше оно будет наблюдаться. Несомненно, что критерий качества должен учитывать это обстоятельство.

На рисунке, в левой части его, приведены периодические графики напряжения с одинаковыми величинами ступеней, но различными длительностями, а справа — зависимости пиков

¹ Такие же ошибки допущены в статье Кунина Р. З. и Лыкова Ю. Ф. в ж. «Промышленная энергетика», 1974, № 2.



(кривая 1) и впадин (кривая 2) этих графиков от 0 (подробнее об определении пиков см. статью Куренного Э. Г. и Дмитриевой Е. Н. в «Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт», 1970, № 6). Как и следовало ожидать, одному и тому же значению θ отвечают различные величины пиков и впадин. Сопоставив эти зависимости с допускаемыми величинами отклонений (заштрихованные области), можно заключить, что по отклонениям напряжения требованиям ГОСТ 13109-67 удовлетворяют второй и третий графики лишь при $\theta \geq 35$ мин и соответственно $\theta \geq 8$ мин (выбор θ см. в [Л. 4]). Заметим, что по колебаниям напряжения ни один из графиков не удовлетворяет стандарту. Между тем, по критерию Айере с дополнением (3) эти графики якобы одинаковы², так как имеют одинаковые значения $N=312$ (%)² и $\bar{v}=-3,95\%$. Как видим, такая

² Использование Куниным Р. З. более строгого слова «равноценны» не позволяет передать все оттенки в ситуации, когда приходится говорить об одинаковой «неодинаковости» неодинаковых графиков напряжения.

оценка в отличие от $\Delta U_{пв}$ и $\Delta U_{вв}$ полностью противоречит физическому смыслу.

Сказанное исключает обсуждение вопроса о приборах: например, нельзя смешивать функции прибора САКН и прибора для оценки колебаний напряжения.

Появление заключительного абзаца рассматриваемой заметки совсем не связано с ее содержанием и, наверное, обусловлено тем, что внимание Кунина Р. З. не привлекли в [Л. 1] ни ссылки на статью в журнале «Электричество», 1967, № 2, ни содержание последнего абзаца стр. 10, где можно найти ответы на выраженное недоумение. К сожалению, Кунин Р. З. не привел результатов своих проверок метода [Л. 1], поэтому остается лишь отметить, что метод экстремальных упорядоченных диаграмм (см. статью Куренного Э. Г. «Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт», 1971, № 6), примененный в [Л. 1] для анализа часто встречающегося на практике нормального распределения, является универсальным. Его эффективность была многократно проверена экспериментально в действующих сетях и методами статистического моделирования, что позволило Дмитриевой Е. Н. («Промышленная энергетика», 1973, № 10) разработать инженерный метод расчета колебаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куренный Э. Г. К определению колебаний электрической нагрузки. — «Электричество», 1972, № 2.
2. Куренный Э. Г., Дмитриева Е. Н. О критериях качества напряжения. — «Изв. вузов. Энергетика», 1971, № 1.
3. Куренный Э. Г., Дмитриева Е. Н. Принципы нормирования качества напряжения на зажимах электроприемников. — В сб.: Опыт проектирования и эксплуатации систем электроснабжения промышленных предприятий. Материалы к Всесоюзному научно-техническому совещанию по электроснабжению промышленных предприятий. М., «Энергия», 1972.
4. Куренный Э. Г., Дмитриева Е. Н., Санаев А. М. О необходимости уточнения стандарта на качество электроэнергии. — «Промышленная энергетика», 1972, № 2.
5. Ailleret P. L'introduction de la mesure dans la notion de la qualite du service d'une distribution d'electricite, et son interet au point de vue de la conception de reseaux. — «Bulletin de la Soc. francaise des Electriciens», 1956, № 61, 7 serie, t. VI.
6. Архипов Н. К. О количественной оценке качества напряжения. «Электричество», 1959, № 12.
7. Веников В. А., Солдаткина Л. А. К вопросу о критериях качества электроэнергии и качества автоматического регулирования режима электросистем. — «Электричество», 1959, № 12.
8. Константинов Б. А. О рациональном использовании электрической энергии в промышленности. — «Труды ЛИЭИ. Вопросы электрификации промышленности и быта», 51. М., «Энергия», 1964.
9. Горбич Ю. С., Мельников Н. А., Окунцов Е. И. К применению прибора САКН. — «Промышленная энергетика», 1973, № 2.

[12.6.1973]

Куренный Э. Г.



Применение вычислительной техники для моделирования и исследования переходных процессов в электрических системах с преобразователями

Этой теме было посвящено совместное заседание секции III «Проблемы теории нелинейных электрических цепей сложных электроэнергетических и электромеханических цепей» Научного совета АН СССР по теоретическим и электрофизическим проблемам электроэнергетики (председатель секции академик Л. Р. Нейман) и Научно-технического совета НИИПТ, которое состоялось 23—24 мая 1974 г. в Ленинграде. На заседании заслушано 14 докладов, которые тематически можно разбить на три группы.

Первая группа докладов была посвящена разработке собственно методов моделирования преобразователей на ЦВМ. Цифровое моделирование в настоящее время становится одним из наиболее эффективных методов расчета переходных процессов в схемах с вентильными преобразователями. Цифровые модели преобразователей, основанные на способах замещения вентилей индуктивными, активными и емкостными сопротивлениями, были рассмотрены в докладе Д. И. Дижуря «Вычислительная устойчивость и погрешность цифровых моделей ППТ» (НИИПТ). Математическое описание цифровых моделей ППТ, как правило, представляет собой системы линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, интегрируемые одним из численных методов (методы Эйлера, Эйлера — Коши, Рунге — Кутты) степенных рядов и их модификации. Выбор численного метода определяет основные характеристики модели: быстродействие и информационную компактность. В работе получены оценки погрешности в моделировании собственных частот и затуханий переходных процессов, исследована вычислительная устойчивость применяемых способов замещения вентилей, получены оценки их погрешности и определены области применения различных схем замещения. Даны обобщенные внешние характеристики цифровых моделей и зависимости их погрешностей от метода и шага численного интегрирования.

В докладе Л. Л. Войтехович, И. Б. Набутовского, Т. М. Юргановой «Блочная цифровая модель вставки постоянного тока» (НИИПТ) изложены результаты разработки цифровой модели для исследования переходных и установившихся режимов вставки постоянного тока. Модель отличается блочным принципом построения, при котором каждому устройству моделируемого объекта ставится в соответствие определенная подпрограмма (блок). Таких блоков в модели семь: «энергосистема», «трансформатор», «синхронный компенсатор», «фильтры», «мост», «регулятор тока», «регулятор угла погасания». Связь между блоками осуществляется специальной управляющей программой. Блочный принцип позволил сообщить цифровой модели компактность, простоту в отладке и настройке.

Построению математической модели вентильного преобразователя, отражающей основные факторы, обуславливающие в схеме колебательные высокочастотные процессы (собственные емкости оборудования, различного рода демпфирующие RC-цепи, индуктивности анодных реакторов, трансформаторов и т. п.) было посвящено выступление А. С. Назарова, Э. Н. Феличкиной «Принципы моделирования на ЦВМ преобразователей с учетом высокочастотных процессов» (НИИПТ). В докладе обосновывается возможность использования при построении цифровой модели преобразователя тех же упрощающих допущений, которые обычно принимаются при приближенных расчетах колебательных процессов. Эти допущения сводятся к замене нулевыми значениями величин некоторых емкостей и индуктивностей схемы по истечении интервала времени, когда составляющие колебаний, обусловленные в основном этими параметрами, можно считать затухшими.

Метод моделирования преобразователей, основанный на концепции идеального вентиля (ток вентиля в непроводящем состоянии равен нулю) изложен в докладе С. В. Захаревича и В. В. Кузнецовой «Автоматизация исследований на базе ЦВМ режимов работы вентильных преобразователей». Алго-

ритмы сформулированы в форме, инвариантной как для схемы, так и для процесса, и обеспечивают исследование при заранее неизвестном порядке горения вентилей. Разработанная программа пригодна для исследования схем с 23 независимыми контурами, 36 вентилями и 12 конденсаторами в схеме.

В докладе В. А. Карпова и В. В. Левченко «Формирование уравнений сложных систем с преобразователями для математического моделирования» (ВЭИ) предложен алгоритм для мостовых преобразователей с идеальными вентилями, который автоматически формирует группы дифференциальных и алгебраических уравнений при любом изменении топологии последовательно соединенных трехфазных мостов подстанции ППТ.

Работа блока формирования основана на использовании математического аппарата, развитого Кронем. Вначале в соответствии с введенной информацией о состоянии вентилей формируются два тензора, связывающие контурные и узловые параметры гипотетических схем мостов с параметрами, которые характеризуют состояние вентилей. После этого с их помощью при каждом изменении топологии схемы формируется система дифференциальных уравнений контурных токов и система алгебраических соотношений, с помощью которых определяются напряжения на негорящих вентилях и полюсах мостов. При использовании этого метода уменьшается число дифференциальных уравнений, используемых на каждом интервале непрерывности.

Вторая группа докладов посвящена разработке численных и аналитических методов анализа переходных процессов и устойчивости систем с вентильными преобразователями. Аналитические методы расчета рассмотрены в докладе А. А. Янко-Триницкого «Метод расчета переходных процессов в вентильных преобразователях» (УПИ). Разработаны два метода, которые дают возможность найти независимо в общем виде законы изменения токов и напряжений на коммутационном и некоммутируемом интервалах без определения момента их сопряжения. Первый метод предполагает подобие цепей переменного и постоянного тока; во втором методе пренебрегается временем коммутации и вводятся необходимые при этом скачки токов в индуктивностях. Оба метода, хотя и исходят из разных предположений, приводят к одному и тому же закону изменения переходных токов на межкоммутационных подынтервалах и к весьма близкому закону для токов на коммутационных подынтервалах.

В докладе Л. Р. Неймана, С. Р. Глинерника и В. А. Лукашова «Метод анализа переходных процессов и устойчивости систем с вентильными преобразователями при различных законах регулирования» (ЛПИ и ВНИИэлектромаш) рассмотрен метод, использующий представление анализируемой системы в переменных состояниях и последующие преобразования структурных схем. В результате расчет сводится к последовательному решению отдельных нелинейных разностных уравнений. Рассмотрена задача расчета переходного процесса и устойчивости преобразователя с регулятором тока с учетом его инерционности и искажений напряжения питающей сети. Показано существенное влияние динамических параметров реального регулятора тока на границы областей устойчивости.

В докладе А. Д. Поздеева «Динамическая модель управляемого выпрямителя при малых отклонениях» (ВНИИР) предложена импульсная динамическая модель «в малом» для переходной составляющей процесса с учетом переменной нагрузки цепи нагрузки в коммутационном и межкоммутационном периодах, удовлетворяющая на участках коммутации точным разностным уравнениям. Такая модель позволяет исследовать процессы при малых отклонениях с применением математического аппарата модифицированного z-преобразования, в том числе проводить анализ устойчивости замкнутых динамических систем с управляемыми выпрямителями.

В докладе А. И. Ступеля, А. Б. Филимонова, Г. М. Цфасмана «Исследование устойчивости «в малом» сложных систем с регулируемыми преобразователями» (ВЭИ) развивается аппарат матричного исследования переходных процессов и устойчивости схем с вентильными преобразователями. Полученные в работе матричные соотношения использованы для расчета областей устойчивости преобразователей, работающих на систему конечной мощности.

Наконец, третья группа докладов была посвящена вопросам применения вычислительной техники для исследования переходных процессов в электрических системах с преобразователями. В докладе В. А. Андреюка, В. А. Шлайфштейна «Метод расчета электромеханических переходных процессов в энергосистемах, содержащих передачи и вставки постоянного тока» (НИИПТ) отмечены особенности, которые появляются при исследовании на ЦВМ электромеханических переходных процессов в энергосистемах с передачами постоянного тока (ППТ). Предложен упрощенный алгоритм учета ППТ, достаточно точно описывающий ее поведение как в симметричной, так и в несимметричной (при несимметричных коротких замыканиях) фазе переходного процесса.

Вопросам выбора схемы замещения линии постоянного тока для расчета на ЦВМ переходных процессов при коротких замыканиях посвящен доклад К. А. Герцика, А. Х. Шлайфштейна «Методика исследований на ЦВМ переходных процессов в ППТ при коротких замыканиях в линии постоянного тока с учетом зависимости ее параметров от частоты» (НИИПТ). В докладе содержится рекомендация по выбору параметров цепочечной схемы линии: верхняя граница частотного диапазона, воспроизводимого схемой замещения, должна быть не ниже 500 Гц, число звеньев цепочечной схемы не должно быть менее 50 для линии длиной 2500 км.

В трех последних докладах изложены результаты использования ЦВМ для исследования и разработки систем регулирования передачи постоянного тока, а именно: доклад Е. С. Алексаняни, И. М. Берха, Т. В. Маныловой «Применение ЦВМ для исследования и разработки системы регулирования передачи постоянного тока» (НИИПТ), доклад

М. Л. Богачкова «Оптимальное управление преобразователями передачи постоянного тока» (ВНИИЭлектромаш) и доклад Г. В. Карасева, И. Б. Набутовского «Исследование устойчивости и качества работы цифрового регулятора тока» (НИИПТ).

В первом из этих докладов изложены результаты исследований на цифровой модели систем регулирования ППТ Экибастуз — Центр, а именно: систем регулирования тока, угла погасания и мощности передачи.

Во втором докладе рассмотрена задача определения оптимального закона управления углом зажигания выпрямителя для достижения минимального времени протекания переходного процесса в передаче постоянного тока.

В последнем докладе рассматривается возможность построения регулятора тока ППТ на цифровых принципах. Показано, что цифровой регулятор тока по своим характеристикам не уступает аналоговому регулятору тока, а его достоинствами является гибкость в выборе закона регулирования, повышение точности обработки сигналов в тракте регулятора и технологическая надежность, обусловленная использованием процессора серийного производства.

Совещание признало необходимыми: 1. Продолжить разработку принципов построения и создания цифровых математических моделей для анализа электромеханических и электромагнитных переходных процессов в системах с передачами и вставками постоянного тока с использованием ЦВМ второго поколения и начать разработки цифровых моделей и автоматизированных комплексов унифицированных программ для ЦВМ третьего поколения (НИИПТ, ВЭИ).

2. Провести работы по сопоставлению различных способов моделирования на ЦВМ преобразователей и определению областей применения различных цифровых моделей и выработке требований к цифровому моделированию энергетических задач (НИИПТ).

3. Разработать гибридные модели сложных энергосистем, состоящие из электродинамических моделей и цифро-аналоговых комплексов и провести комплексное исследование процессов и устойчивости систем с передачами и вставками постоянного тока (НИИПТ, ВНИИЭлектромаш).

Канд. техн. наук АНДРЕЮК В. А.



УДК 538.65(049)

Проблемы применения сильных импульсных магнитных полей

(Заседание IV секции Научного совета по теоретическим и электрофизическим проблемам электроэнергетики АН СССР совместно с II Всесоюзной конференцией по магнитно-импульсной обработке металлов.)

В Харьковском политехническом институте им. В. И. Ленина 27–29 ноября 1973 г. состоялось заседание IV секции Научного совета по теоретическим и электрофизическим проблемам электроэнергетики АН СССР совместно с II Всесоюзной научно-технической конференцией по магнитно-импульсной обработке металлов. В работе заседания, кроме членов Научного совета, участвовали представители ведущих вузов страны, научно-исследовательских институтов и промышленных предприятий различных министерств.

В тематике заседания определялись следующие основные разделы:

1. Электрофизические и теоретические проблемы получения импульсных магнитных полей для научных и технологических целей.
2. Проектирование и исследование аппаратуры для получения сильных магнитных полей.
3. Поведение материалов при воздействии импульсного магнитного поля. Технологические процессы при магнитно-импульсной обработке материалов.

В докладах первого раздела тематики заседания анализировались электромеханические переходные процессы при магнитно-импульсной обработке металлов, электромагнитные процессы с учетом диффузии поля в проводники, методы расчета полей в индукторных системах.

В докладах А. Н. Андреева, В. Н. Бондалетова, Е. Н. Иванова и В. Г. Филиппова определены условия наиболее эффективного преобразования электрической энергии емкостного накопителя в механическую работу при индуктивно-динамическом ускорении проводников, проанализированы возможные

направления и особенности применения импульсных магнитных полей для силового воздействия на проводящие тела. Доклад А. Б. Новгородцева посвящен определению условий оптимального преобразования энергии при расщепе тонкостенных цилиндров в магнитном поле соленоида. Показано, что при радиальном расширении цилиндра условия получения максимального к. п. д. близки к тем, которые имеют место в системе с линейно изменяющейся индуктивностью.

В докладе В. Т. Михельсоо, Г. А. Шнейерсона и А. П. Щербакова сообщалось об экспериментах по исследованию захвата и сжатия магнитного потока короткой цилиндрической оболочкой, деформируемой в поле одновиткового соленоида. В этих опытах получены магнитные поля с индукцией до 340 т.

Группа докладов была посвящена новым видам магнитно-импульсной обработки металлов и другим приложениям сильных магнитных полей.

Специальные вопросы, связанные с магнитно-импульсной обработкой деталей, нагреваемых индуктированным током, рассмотрены в докладе И. В. Белого, Л. Д. Горкина и Л. Т. Хименко. Анализ процесса расширения цилиндрической оболочки в магнитном поле коаксиального индуктора, расположенного снаружи детали, сделан в докладе С. М. Фертника, И. В. Белого, Л. Т. Хименко, М. И. Баранова и В. З. Бенгуса. Предложены различные схемные варианты установок для расширения оболочек этим способом.

М. Н. Быстров и А. Ф. Павлов рассмотрели условия получения максимальной интенсивности акустической волны, возбужденной с помощью мембраны, давление на которую осуществляется сильным импульсным магнитным полем. Значительное число выступлений было посвящено анализу проникновения поля в проводящую среду. Одной из основных задач, решаемых различными авторами, была задача расчета тока в разрядном контуре с учетом проникновения поля в проводники, в которых заметно проявляется поверхностный

эффект.

В докладе **М. И. Баранова, И. В. Белого и Л. Т. Хименко** были введены постоянные сосредоточенные параметры из рассмотрения стационарного синусоидального электромагнитного поля в материале индуктора и обрабатываемой детали.

Выступление **В. Н. Бондалетова** было посвящено методике определения переменных параметров схем замещения индуктора и детали. При этом автор исходил из допущения, что ток в цепи разряда изменяется по экспоненциально затухающей синусоиде.

В докладе **Б. Э. Фридмана** сделан анализ переходного процесса в разрядном контуре с помощью частотных характеристик и получены поправки к решению уравнения колебательного контура, связанные с проникновением поля в проводники. Приблизженные оценки влияния проникновения поля через обрабатываемую деталь, неоднородности поля и других факторов на величину давления на деталь приведены **Ю. А. Поповым**.

Е. Н. Чернов предложил схему замещения плоского индуктора, расположенного вблизи проводящей детали. В ходе обсуждения докладов, посвященных анализу переходных процессов в разрядном контуре конденсатора, возникла дискуссия, которая показала различные точки зрения на применимость приближенных методов.

В сообщениях **Я. М. Баткилина и В. И. Когана, В. Н. Бондалетова и Е. Н. Чернова** выполнен анализ проникновения электромагнитного поля в движущийся проводник.

Несколько докладов были посвящены расчетам полей индукторных систем при допущении идеальной проводимости. **А. Б. Новгородцевым** изложен метод расчета поля осесимметричных соленоидов с произвольной формой поперечного сечения. Метод основан на численном решении интегрального уравнения для плотности поверхностного тока. В докладе **О. Б. Брона и А. М. Сегалия** предложена методика расчета поля многовитковых конических и цилиндрических индукторов с помощью непрерывного распределения параметров, которая позволяет учесть потоки рассеяния между витками. В сообщении **Г. В. Остроумова** дано решение задачи о расчете потока рассеяния цилиндрического индуктора с витками прямоугольного сечения. В этом решении использован принцип максимума проводимости трубок магнитного поля. **В. Н. Острейко** предложил метод расчета индуктивностей соленоидов при резком поверхностном эффекте, основанный на приближенной замене действительного распределения поля, обладающего осевой симметрией, плоскопараллельным полем.

В докладах второго раздела тематики были рассмотрены вопросы, связанные с проектированием установок для получения импульсных магнитных полей и их элементов (конденсаторов, коммутирующих и зарядных устройств, индукторов).

Институтом атомной энергии им. **И. В. Курчатова** (доклад **А. М. Андрианова, В. Ф. Демичева, Г. А. Елисеева, П. А. Левита, Д. В. Науменко**) разработаны три модели установок повышенной частоты для магнитно-импульсной обработки металлов с низкой электропроводностью. В Харьковском политехническом институте им. **В. И. Ленина** (доклады **С. М. Фертника, И. В. Белого, Л. Т. Хименко, Л. Д. Горкина, Е. Н. Коротченко, Н. А. Кречетовой, А. Т. Межуева**) разработана серия магнитно-импульсных установок с запасаемой энергией 6, 20 и 100 кДж, обеспечивающих широкий круг технологических операций. Доклады сопровождались демонстрацией действующих установок. Доклад о промышленных установках для обжигания трубчатых заготовок, созданных в ВПТИ-электро (г. Ленинград), был сделан **Б. И. Голубом, А. А. Дятленко, В. Н. Калининым** и др. В других докладах и сообщениях особое внимание уделялось вопросам оптимизации параметров магнитно-импульсных установок, путем повышения собственной частоты установок, необходимой при обработке деталей из высокопрочных проводящих материалов.

Большая группа докладов была посвящена разработкам емкостных накопителей энергии, коммутирующих элементов, зарядных устройств, индукторных систем.

В докладе **Г. С. Кучинского и О. В. Шилина**, посвященном надежности изоляции импульсных конденсаторов, показано, что срок службы конденсаторов определяется временем разрушения твердой изоляции под действием критических частичных разрядов. Описаны механизмы пробоя изоляции и даны практические рекомендации по расчету надежности конструкций конденсаторов. Доклад **В. Д. Беспалова, В. В. Конотона и С. М. Фертника** был посвящен исследованию влияния режима эксплуатации импульсных конденсаторов на их удельно-эконо-

мические характеристики. С помощью методов многофакторного планирования была получена, в частности, зависимость ресурса от напряженности поля, декремента затухания и частоты тока. Приведены также формулы для расчета стоимостных и весовых удельных характеристик конденсаторов. В докладе **Д. С. Варшавского, Г. А. Овчинникова, В. С. Лысенко и Н. Л. Чижовой** исследовано распределение напряжений внутри конденсатора при выходе из строя отдельных секций, даны рекомендации по повышению эффективности использования секций.

Представители Харьковского политехнического института им. **В. И. Ленина**, Куйбышевского авиационного института им. **С. П. Королева**, Чувашского государственного университета в своих сообщениях рассказали об интересных конструктивных решениях высокопрочных индукторов для различных технологических операций.

Большое число докладов и сообщений было посвящено вопросам третьего раздела тематики заседания. **Е. Г. Иванов** доложил о возможности использования модели жестко-пластического тела для расчета процессов магнитно-импульсного деформирования. Результаты проведенного анализа позволили сделать вывод о нецелесообразности применения модели жестко-пластического тела при расчете динамических процессов из-за того, что в конечном выражении уравнения движения не входит предел текучести материала. **Е. Г. Ивановым** сделан также доклад об экспериментальном определении механических характеристик материалов при нагружении импульсным магнитным полем.

Исследованию динамического упрочнения металлов был посвящен доклад **Г. П. Большакова и Н. Н. Колесниченко**. В задачи исследования входило, в частности, определение динамических диаграмм $\sigma-\varepsilon$ при растяжении цилиндрических образцов. Пластическая потеря устойчивости цилиндрической оболочки рассматривалась в докладе **Н. Н. Колесниченко**. Изучение движения оболочек под действием радиально равномерно распределенного импульса давления магнитного поля позволило сделать вывод, что устойчиво деформируются только трубы с относительным радиусом ≤ 5 . Процессы динамической раздачи труб с заземленными и свободными концами из изотропного жестко-пластического упрочняющегося материала рассмотрены в докладе **А. А. Есина**. Для процессов равномерной раздачи труб, при которых они сохраняют свою первоначальную форму, получены приближенные соотношения для расчета окружающих деформаций в зависимости от параметров импульса давления.

Группа докладов была посвящена влиянию импульсного магнитного поля на структурные преобразования в металлических деталях. В частности, исследования, выполненные **Б. В. Бугаевым, В. Н. Киселевым, В. А. Скаженником, В. Д. Пененко, М. Л. Туревским** позволили выявить наличие возникающей в результате обработки импульсным магнитным полем упругой области, а также зависимость ее границ от параметров воздействия. Эффективность обработки практически определяется лишь теми характеристиками поля, которые определяют величину возникающих в конструкции динамических напряжений. При одинаковой энергии импульса целесообразно понижение частоты разрядного контура.

Л. Д. Ворончихин, Л. Н. Ромашов, В. Д. Садовский, И. Г. Факидов познакомили слушателей с особенностями образования мартенсита в образцах из стали 50X2H20 под действием импульсного магнитного поля. В докладе **В. Н. Киселева, Т. П. Лосева, В. Д. Пененко, В. А. Скаженника, М. Л. Туревского** приведены результаты исследований процесса упрочнения импульсным магнитным полем железо-углеродистых сплавов различных марок. Упрочнение, аналогичное упрочнению при обработке металлов взрывом, наблюдается в поверхностном слое образцов.

Установлено, что наиболее целесообразно применение процесса упрочнения стали аустенитного класса, малоуглеродистых сталей и чугуна.

Значительное число докладов, посвященных технологии магнитно-импульсной обработки металлов, было сделано представителями Куйбышевского авиационного института и других организаций.

На заседании было принято развернутое решение, содержащее рекомендации по успешному решению проблем применения сильных импульсных магнитных полей и внедрению научных достижений в производство.

Ученый секретарь оргкомитета,
канд. техн. наук Михайлов В. М.

СОДЕРЖАНИЕ

Веников В. А., Либкинд М. С., Константинов Б. А. — Народнохозяйственное значение повышения качества электроэнергии	1	Шаргородский В. Л. — Анализ феррорезонансных процессов в трехфазных сетях с изолированной нейтралью при пофазной симметрии элементов колебательных контуров	65
Солдаткина Л. А. — Несимметрия напряжений в трехфазных электрических сетях и способы ее снижения	5	Из опыта работы	
Маркушевич Н. С. — Информационное обеспечение процесса управления качеством электроэнергии	11	Александров Г. Н., Соловьев Э. П. — Повышение стойкости к частичным дуговым разрядам изоляционных полимерных материалов	74
Бурков Ю. А., Казанцев В. Н. — Контроль параметров режима электрической сети энергосистемы	17	Абрамян В. К. — Электризация проводящего тела в потоке заряженных диэлектрических частиц	76
Гусейнов Ф. Г., Мамедяров О. С. — Повышение качества электрической энергии в распределительных сетях	19	Гурьянов С. И., Зархи М. И., Мешков В. Н., Фейгин С. Г., Филичев О. Н., Блоцкий Н. Н., Ботвинник М. М., Климов Б. П., Мамиконянц Л. Г., Фези-Жилинская М. С., Шакарян Ю. Г., Рагозин А. А., Яковлев О. И. — Испытания асинхронизированного генератора мощностью 50 Мв·а в динамических режимах	79
Жежеленко И. В., Сорокин В. М. — Высшие гармоники в электрических сетях	23	Сообщения	
Винославский В. Н. — Распределение допустимой потерн напряжения в электрических сетях из условия минимальных приведенных затрат	28	Никитин Ю. М. — Аппроксимация оценок корреляционной функции в энергоснабжении электрических железных дорог	81
Шахвердян С. В. — К численным методам управления точными режимами энергосистем с учетом нестационарных процессов в нижнем бьефе ГЭС	32	Айрапетян Г. А., Айрапетян Ю. И. — Исследование режимов энергосистем с АЭС при снижении частоты и работе АЧР	82
Китушин В. Г., Хомлянская Л. Д. — Состав узлов нагрузок по видам токоприемников и его определение	37	Токарева В. Д. — Одно- и двухкаскадная релейные следящие системы с быстродействующими электромагнитными муфтами	85
Кимельман Л. Б., Быцкая С. Р., Лосев С. Б. — Автоматизация расчета параметров дистанционных защит линий 110 кВ и выше с использованием ЦВМ	41	Дискуссии	88
Попков В. И., Рябая С. И. — Распределение тока униполярной короны на некоронирующем и коронирующем электродах	45	Хроника	91
Беляков Н. Н., Зилес Л. Д. — Применение теории случайных функций к расчету статистических характеристик внутренних перенапряжений	51		
Верещагин И. П., Заргарян И. В., Семенов А. В. — Расчет электростатического поля между иглой и плоскостью	54		
Анненков В. З. — Расчет импульсного сопротивления протяженных заземлителей в плохо проводящих грунтах	59		

CONTENTS

The Importance to the National Economy of Improving the Quality of Electric Energy — V. A. Venikov, M. S. Libkind, B. A. Constantinov	1	Calculating the Electrostatic Field Between a Needle and a Plane — I. P. Vereschagin, I. V. Zargarian, A. V. Semenov	54
Voltage Unbalances in Three-phase Networks and Ways of Reducing Them — L. A. Soldatkina	5	Calculating the Surge Resistance of Extensive Grounding Structures in Poorly Conducting Soils — V. Z. Annenkov	59
Informational Software for Controlling the Quality of Electric Energy — N. S. Markushevich	11	An Analysis of Ferroresonant Processes in Three-phase Networks with Ungrounded Neutrals for Phase Symmetry of the Oscillating Circuit Elements — V. L. Shargorodski	65
Monitoring the Parameters of Network Operating Conditions in a Power System — U. A. Burkov, V. N. Kazantsev	17	FROM OPERATING EXPERIENCE	
Improving the Quality of Electric Energy in Distribution Networks — F. G. Gusaynov, O. S. Mamedyarov	19	Improving the Withstand to Partial Arcing Discharges of Polymer Insulating Materials — G. N. Alexandrov, E. P. Solovov	74
Higher Harmonics in Networks — I. V. Djedjelenko, V. M. Sorokin	23	Electrization of a Conducting Body in a Stream of Charged Dielectric Particles — V. K. Abramian	76
Distribution of Permissible Voltage Losses in Networks Securing Minimum Equivalent Expenditures — V. N. Vinoslavski	28	Testing a 50 MVA Asynchronous Generator Under Dynamic Conditions — S. I. Gurianov, M. I., Zarkhi, V. N. Meshkov, S. G. Feigin, O. N. Filichev, N. N. Blotski, M. M. Botvinnik, B. P. Klimov, L. G. Mamikonians, M. S. Fezi-Djilinskava, U. G. Shakarian, A. A. Ragozin, O. I. Yakovlev	79
On Numerical Methods for Controlling Daily Operating Conditions in Power Systems with Account Taken of Transients in the Tailwater of Hydro-electric Stations — S. V. Shakhverdyan	32	REPORTS	
The Composition of Load Centers as to Types of Consumers and its Determination — V. G. Kitushin, L. D. Homlianskaya	37	Approximation of Correlation Function Estimates in the Power Supply of Electrified Railways — U. M. Nikitin	81
Automatic Calculation of Distance Protection Settings for Lines of 110 kV and Higher on a Digital Computer — L. B. Kimelman, S. R. Bichutskaya, S. B. Losev	41	The Performance of Systems with Nuclear Power Stations for Drops in Frequency and Operation of Automatic Load Shedding — G. A. Airapetian, U. I. Airapetian	82
Distribution of Unipolar Corona Current on Uncoronating and Coronating Electrodes — V. I. Popkov, S. I. Riabaya	45	One- and Two-Cascade Relay Follow-up Systems with High-Speed Electromagnetic Couplings — V. D. Tokareva	85
Application of Stochastic Function Theory to the Calculation of Statistical Characteristics for Switching Surges — N. N. Beliakov, L. D. Ziles	51	DISCUSSION	88
		CHRONICLE	91

РЕФЕРАТЫ ПУБЛИКУЕМЫХ СТАТЕЙ

УДК 621.311.016.4.002.237

Народнохозяйственное значение повышения качества электроэнергетики. Веников В. А., Либкинд М. С., Константинов Б. А. — «Электричество», 1974, № 11.
Рассматриваются показатели качества электроэнергии и последствия его снижения. Анализируется понятие ущерба при ухудшении качества электроэнергии и показывается экономический эффект при повышении качества электроэнергии. Библ. 2.

УДК 621.316.015:658.562

Несимметрия напряжений в трехфазных электрических сетях и способы ее снижения. Солдаткина Л. А. — «Электричество», 1974, № 11.

Рассмотрены причины возникновения несимметрии напряжений и токов в распределительных сетях промышленных предприятий и городов в районах с коммунально-бытовой нагрузкой. На основании анализа состояния вопроса о симметрировании параметров режимов в этих сетях даны рекомендации о количественной оценке показателей несимметрии напряжения. Приведены упрощенные методы оценки параметров простейших симметрирующих устройств. Библ. 13.

УДК 621.311:658.562:62.012.45

Информационное обеспечение процесса управления качеством электроэнергии. Маркушев Н. С. — «Электричество», 1974, № 11.
Приведены основные требования к построению информационной сети и к содержанию информации о качестве электроэнергии. Описывается современное состояние вопроса и формулируются первоочередные задачи в данной проблеме. Библ. 17.

УДК 621.311.1:658.562

Контроль параметров режима электрической сети энергосистемы. Бурков Ю. А., Казанцев В. Н. — «Электричество», 1974, № 11.

Излагаются принципы контроля параметров режима электрической сети энергосистемы. Приведены некоторые результаты исследований Уральского отделения ОРГРЭС по этому вопросу. Библ. 3.

УДК 621.311:658.562:621.316.1

Повышение качества электрической энергии в распределительных сетях электрической системы. Гусейнов Ф. Г., Мамедяров О. С. — «Электричество», 1974, № 11.

Рассматривается применение методов статистической динамики для получения передаточной функции, частотной и статической характеристик по напряжению узла нагрузки на основе пассивного эксперимента, экстраполяции статической характеристики, снятой в области (0,85—1,1) на физической модели на более широкую область изменения напряжения и обобщение экономической характеристики по напряжению с использованием теории подобия на класс подобных объектов. Показана целесообразность использования метода планирования эксперимента для выбора и размещения компенсирующих устройств в распределительных сетях и уточнения их мощности при учете неточности задания исходных параметров. Использование методики проиллюстрировано на примерах. Библ. 8.

УДК 621.316.1.018.3

Высшие гармоники в электрических сетях. Жежелев И. В., Сорокин В. М. — «Электричество», 1974, № 11.
Широкое внедрение мощных вентиляльных преобразователей, электродуговых печей и других устройств с существенно нелинейными характеристиками приводит к появлению значительных величин высших гармоник токов и напряжений в электрических сетях. Гармоники отрицательно влияют на электрооборудование, системы релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи.

Снижение уровней гармоник определяется не только технической целесообразностью, но и экономическими соображениями; предпочтение должно быть отдано устройствам многоцелевого назначения, позволяющим улучшить одновременно несколько показателей качества электроэнергии. Библ. 12.

УДК 621.316.1.001.24.003.1

Распределение допустимой потери напряжения в электрических сетях из условия минимальных приведенных затрат. Вииславский В. Н. — «Электричество», 1974, № 11.

Рассматривается в общем виде метод расчета электрических распределительных сетей на минимум приведенных затрат при наличии ограничений по допустимой потере напряжения. Приводятся аналитические выражения для определения потери напряжения в произвольной линии распределительной сети с любой степенью неоднородности и разветвленности в зависимости от расчетных параметров всей сети и допустимой потери напряжения. Библ. 3.

УДК 621.311.001.24.003.1:681.142

К численным методам управления суточными режимами энергосистем с учетом нестационарных процессов в нижнем бьефе ГЭС. Шахвердян С. В. — «Электричество», 1974, № 11.

Предлагается метод (с подробным численным алгоритмом) решения задачи оптимального управления суточными режимами энергосистем с учетом нестационарных процессов, ограничений типа неравенств на уровень нижнего бьефа ГЭС как по абсолютной величине, так и по амплитуде колебания, а также на управляющие параметры (мощности ГЭС и расходы через ГЭС). Доказывается полная идентичность метода Валентина и известной теоремы Куна—Таккера из нелинейного программирования. Задача решается принципом максимума в сочетании с методом интегральных штрафных функций, благодаря чему стало возможным организовать единую вычислительную процедуру для выбора начальных значений сопряженных уравнений гамильтоновой системы, множителей Лагранжа и штрафных коэффициентов. Библ. 11.

УДК 621.3.016.3.001.5

Состав узлов нагрузок по видам токоприемников и его определение. Китущин В. Г., Хомлянская Л. Д. — «Электричество», 1974, № 11.

Излагается метод определения состава узла комплексной нагрузки по информации об отраслевой структуре нагрузки узла и по статистическим данным о составе нагрузки по видам токоприемников различных отраслей. Приводятся результаты статистической обработки данных со составу нагрузки групп предприятий различных отраслей, вероятностные характеристики основных параметров двигательной нагрузки. Методика может быть использована для определения параметров эквивалентных двигателей, регулирующих эффектов нагрузки, статических характеристик и т. д. в различных задачах по расчету устойчивости, качества электроэнергии, надежности и т. д. Библ. 3.

УДК [537.52.3:621.3.014.14]0.01

Распределение тока униполярной короны на некоронирующем и коронирующем электродах. Попков В. И., Рябая С. И. — «Электричество», 1974, № 11.

Определены условия лабораторных измерений вольт-амперных характеристик короны при схеме провод—земля, обеспечивающие малое влияние окружающих предметов. Проведен анализ измеренных в этих условиях вольт-амперных характеристик на основе расчетного уравнивания для схемы провод—плоскость.

Представлены результаты детальных измерений распределения плотности тока униполярной короны в плоскости земли. В обобщенном виде $j_{\text{кр}}/U$ это распределение оказывается инвариантным в отношении интенсивности короны и геометрии электродов, что согласуется с ранее данным теоретическим решением. Показано, что аналогичное распределение по поверхности коронирующего провода не обладает такой инвариантностью и распределение плотности тока короны по окружности гладкого провода неоднородно. Максимальная плотность тока здесь в 2,35 раза превосходит среднюю плотность. Библ. 8.

УДК 621.3.015

Применение теории случайных функций к расчету статистических характеристик внутренних перенапряжений. Беляков Н. Н., Зилес Л. Д. — «Электричество», 1974, № 11.

Последовательность коммутационных переходных процессов в фиксированной точке электрической сети представляет собой стационарную случайную функцию времени. Разработана методика расчета ее характеристик, зависящих от параметров сети и распределения углов коммутации выключателей и другой коммутационной аппаратуры. На основе теории выбросов разработан метод вычисления вероятности высоких перенапряжений. В качестве примера приведен расчет статистических характеристик перенапряжений при включении холостой линии. Результаты сопоставлены с величинами, полученными методом Монте-Карло на ЦВМ. Библ. 6.

УДК 621.319.7.001.24

Расчет электростатического поля между иглой и плоскостью. Верещагин И. П., Заргарян И. В., Семенов А. В. — «Электричество», 1974, № 11.

Приведены результаты расчета поля между иглой и плоскостью на ЦВМ. Подробно рассмотрен вопрос о точности расчетов по методу эквивалентных зарядов. Приведены практические рекомендации по проведению расчетов. Разработана приближенная методика расчета поля без применения ЦВМ. Результаты расчета сопоставлены с экспериментальными данными. Библ. 8.

УДК 537.525.5:621.315.616.9

Повышение стойкости к частичным дуговым разрядам изоляционных полимерных материалов. Александров Г. Н., Соловьев Э. П. — «Электричество», 1974, № 11.

На основе анализа процесса разрушения полимерных материалов при воздействии на них поверхностных частичных разрядов в условиях загрязнения и увлажнения (явление трекинга) показана преимущественная роль окислительных процессов в процессе трекинга полимеров. С учетом нового подхода в оценке трекинга получены трекингоустойчивые компаунды на основе эпоксидных диановых смол. Показана активная роль неорганического наполнителя в явлении трекинга. Для трекингоустойкого стеклопластика необходимо иметь устойчивое к воздействию продуктов разрядов как связующее, так и стеклонаполнитель. Илл. 9.

УДК 621.359.5

Электризация проводящего тела в потоке заряженных диэлектрических частиц. Абрамян В. В. — «Электричество», 1974, № 11.

Приводятся результаты экспериментального и теоретического исследования электризации проводящего тела, находящегося в двухфазных потоках «газ—твердые частицы». Получены выражения, описывающие кинетику электризации тела в указанных условиях. Рассматриваются практические примеры для определения потенциала шарообразного тела и тока от него в установившемся режиме.

Рассмотрена возможность применения «зондового» метода для измерения заряда частиц в двухфазных потоках «газ—твердые частицы». Доказано, что при наличии контакта частиц потока с измерительным зондом потенциал зонда не характеризует электростатическое поле

заряженных частиц потока, так как такой контакт приводит к статической электризации зонда, которая в аппаратах «кипящего слоя» и системах пневмотранспорта преобладает над остальными возможными явлениями. Предлагается способ измерения заряда частиц потока с помощью измерения тока от шара-зонда на землю. Библ. 10.

УДК 621.313.322.001.4

Испытания асинхронизированного генератора мощностью 50 Мва в динамических режимах. Гурьянов С. И., Зархи М. И., Мешков В. Н., Фейгин С. Г., Филичев О. Н., Блоцкий Н. Н., Ботвинник М. М., Климов Б. П., Мамиконянц Л. Г., Фези-Жилинская М. С., Шакарян Ю. Г. — «Электричество», 1974, № 11.

Приведены результаты испытаний генератора мощностью 50 Мва в динамических режимах при трехфазных коротких замыканиях. Результаты испытаний показали высокие динамические свойства генератора и подтвердили его работоспособность в аварийных ситуациях. Библ. 4.

УДК 621.311.4:625.1.001.57

Аппроксимация оценок корреляционной функции в энергоснабжении электрических железных дорог. Никитин Ю. М. — «Электричество», 1974, № 11.

Анализируется достоверность оценок ординат эмпирических корреляционных функций при обработке результатов наблюдений путем прямого моделирования случайного процесса по заданной корреляционной функции. На основании полученных результатов даются рекомендации по определению параметров корреляционных функций при исследовании случайных процессов в энергоснабжении электрических железных дорог. Библ. 6.

УДК 621.311.018.41

Исследование режимов энергосистем с АЭС при снижении частоты и работе АЧР. Айрапетян Ю. П. — «Электричество», 1971, № 11.

Составлена математическая модель процессов, которая включает уравнения динамики энергосистемы, реактора, парогенератора, турбины, ГЦН и ПЭН и системы регулирования, представленных эквивалентными параметрами. Предложена монограмма и дана методика выбора уставок АЧР-П из условий сохранения допустимого уровня воды в парогенераторе и компенсации снижения мощности АЭС при понижении частоты в энергосистеме. Библ. 3.

УДК 62-83:62-503.53

Одно- и двухкаскадная релейные следящие системы с быстродействующими электромагнитными муфтами. Токарева В. Д. — «Электричество», 1974, № 11.

В статье анализируется влияние на динамическую точность релейной следящей системы с быстродействующими электромагнитными муфтами различных вариантов системы силового привода муфты: регулируемого привода, скорость которого меняется одновременно со скоростью следящей системы подачи — двухкаскадная следящая система; нерегулируемого привода — однокаскадная следящая система.

Показано, что для однокаскадных систем приемлемая точность может быть обеспечена лишь на малых скоростях работы. Указаны пути уменьшения пусковой ошибки. Библ. 2.



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

В. В. Афанасьев, А. И. Бertiнов, В. Г. Бирюков, В. А. Веников, И. С. Ефремов, Д. Г. Жимерин, А. М. Залесский, П. М. Ипатов, М. П. Костенко, Л. Г. Мамиконянц (главный редактор), Л. Р. Нейман, И. И. Петров, С. И. Рабинович, А. М. Федосеев, М. Г. Чиликин, А. С. Шаталов.

Адрес редакции: 103012 Москва, Б. Черкасский пер., 2/10. Телефон 294-24-80.

Почтовый адрес: 101000 Москва, Главный почтамт, абонентный ящик № 648.

Адрес для телеграмм: МОСКВА 12, ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

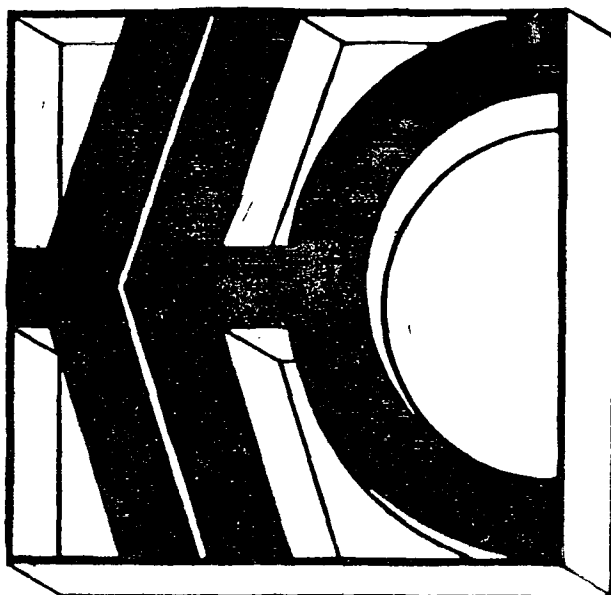
Технический редактор Л. Н. Никитина

Сдано в набор 16/IX 1974 г.
Формат 60×90¹/₈
Тираж 9 575 экз.

Подписано к печати 1/XI 1974 г.
Печ. л. 12
Зак. 928

T-18337
Уч.-изд. л. 15,62
Цена 80 коп.

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли. Москва М-114, Шлюзовая наб., 10.

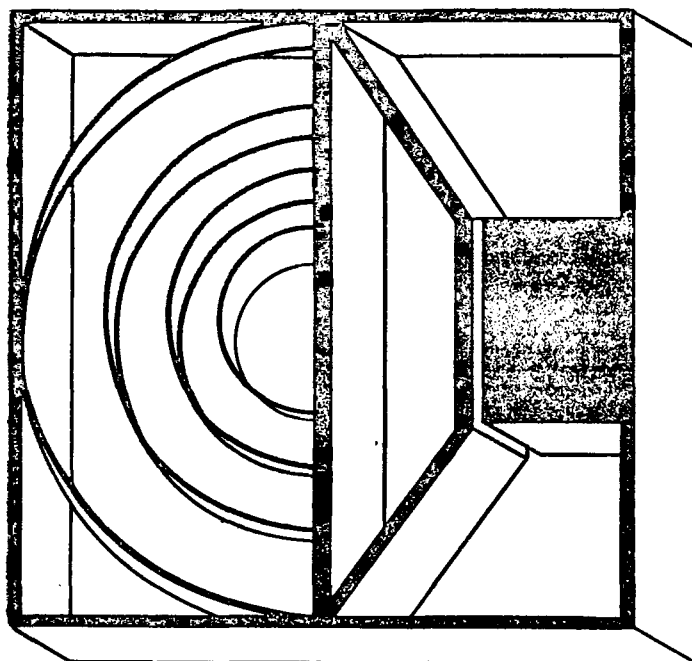


**ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ЭКСПОРТЕР ИЗДЕЛИЙ
БОЛГАРСКОЙ ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ**



Electroimpex

**ЭКСПОРТЕР
000 «ЭЛЕКТРОИМПЕКС» — СОФИЯ
УЛ. Г. ВАШИНГТОНА, 17
ТЕЛЕФОН 88-49-91
ТЕЛЕКС 022575**



ПОЛНЫЙ КОМПЛЕКТ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ГРОМКОГОВОРИТЕЛЕЙ

**КРУГЛЫХ
ЭЛЛИПСООБРАЗНЫХ
НИЗКОЧАСТОТНЫХ
ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ
ШИРОКОПОЛОСНЫХ
МОЩНОСТЬЮ ОТ 0,15
ДО 12,5 Вт**

**ИСПОЛНЕНИЕ: ДЛЯ НОРМАЛЬНОГО
И ТРОПИЧЕСКОГО КЛИМАТА
С ВЫСОКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ**



Electroimpex

**ЭКСПОРТЕР
000 «ЭЛЕКТРОИМПЕКС» — СОФИЯ
УЛ. Г. ВАШИНГТОНА, 17
ТЕЛЕФОН 88-49-91
ТЕЛЕКС 022575**

Электричество, 1974, № 11, 1—96.