

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1954


госэнергоиздат

8

СОДЕРЖАНИЕ

И. А. Сыромятников — Применение способа самосинхронизации для включения синхронных машин на параллельную работу	3
Л. Г. Мамиконянц — Электромагнитные моменты вращения синхронных машин при включении их в сеть способом самосинхронизации	9
Ю. М. Элькинд — Схемы и устройства для включения на параллельную работу синхронных генераторов способом самосинхронизации	16
Б. К. Буль — Метод расчета катушки со сталью на переменном токе	22
Г. Н. Петров и С. С. Окунь — О некоторых явлениях взаимоиндукции в цепях со сталью	27
М. В. Костенко, И. Ф. Половой и А. Н. Шеренцис — Выбор импульсного уровня изоляции аппаратов и трансформаторов 400 кв	31
С. А. Бахарев — Электропривод широкого диапазона с внутренними обратными связями	37
Ф. Э. Ильгекит и О. Д. Жондецкая — Комплексное подавление радиопомех, создаваемых электрооборудованием предприятий	44
Н. А. Марков — Аналитический метод расчета несимметричных режимов трехфазных дуговых электропечей	47
В. К. Невежин — Влияние состава межэлектродной среды на износ диска-катода и производительность электроискровой разрезки металлов	52
В. М. Юзаков — К выражению закона Бю и Савара	57
Н. Н. Сидоров — Расчет кривых нагревания элементов нагружочных сопротивлений с учетом изменения их теплоотдачи и теплопроводности	59
В. М. Скобелев — Влияние схемы включения на световой поток люминесцентных ламп	61
ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ	
Ф. Г. Рыклин — Включение синхронных машин способом самосинхронизации без проверки частоты	64
А. А. Горьков — Об улучшении использования сварочных трансформаторов	65
ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ	
М. А. Розенблат и А. Ф. Сенченков — Магнитные усилители	67
ДИСКУССИИ	
Требования к синхронным двигателям и их схемам управления и защиты — С. А. Мотыгина и Ф. Г. Беличенко . Новая схема и конструкция распредустройства электростанции — Б. И. Розенберг . „Определение экономической плотности тока в кабельной сети — П. Г. Грудинский, Е. Н. Приклонский, Л. А. Вааг, В. Т. Рождественский	73
ЗАМЕТКИ И ПИСЬМА	
Больше ответственности в работе автора	83
ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ	
Многопозиционные газоразрядные переключатели. Дифференциальная защита самолетных генераторов постоянного тока	84
ХРОНИКА	
Пленум правления ВНИТОЭ. В Московском электромеханическом институте инженеров железнодорожного транспорта им. Дзержинского. Научно-техническая конференция ВЗЭИ. В доме инженера и техника им. Дзержинского. Профессор А. М. Федосеев . Профессор А. Я. Тер-Хачатуров	87
БИБЛИОГРАФИЯ	
А. А. Воробьев, Н. И. Воробьев, М. Н. Трескина, Г. А. Воробьев, И. И. Каляцкий, А. М. Трубицын, В. С. Дмитриевский, А. Ф. Калганов, В. Д. Кучин — Книга коллектива авторов под. ред. Л. И. Сиротинского „Техника высоких напряжений“, ч. 1 и 2	91
Ответ авторов и редактора	93
С. Д. Волобринский и М. Н. Звездкин — Книга И. Я. Рышковского и К. Г. Кучмы „Тяговые подстанции“	94
Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике	96
Номограмма для решения уравнения четвертой степени (номограмма на третьей полосе обложки)	96



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

главный редактор **И. Г. Дроздов**,
зам. главного редактора **И. А. Сыромятников**,
члены редколлегии: **К. А. Андрианов, Г. В. Буткевич, А. А. Глазунов, В. А. Голубцова,**
Е. Г. Комар, М. Я. Костенко, А. М. Федосеев, М. Г. Чиликин,
М. А. Шателен.

Адрес редакции: Москва, Б. Черкасский пер., д. № 2. Тел. К 4-24-80

Адрес для телеграмм: Москва Электричество.

Адрес для корреспонденции: Москва, Главный почтамт,
почтовый ящик № 648.

Применение способа самосинхронизации для включения синхронных машин на параллельную работу

Доктор техн. наук, проф. И. А. СЫРОМЯТНИКОВ

Техническое управление Министерства электростанций СССР

Введение. Раньше синхронные машины включались на параллельную работу исключительно по методу так называемой точной синхронизации. При этом методе машина включается при равенстве частот, напряжений и совпадении фаз напряжений машины и сети. Включение сначала производилось преимущественно вручную, притом специально обученным персоналом, так как операция является весьма ответственной. В эксплуатации неоднократно имели место тяжелые повреждения генераторов в виде полного разрушения обмотки статора вследствие ошибочного включения с большим расхождением фаз.

Включение по способу точной синхронизации требует от персонала напряженного внимания и занимает иногда очень много времени, до 10—20 мин, что совершенно недопустимо, особенно при ликвидации аварии, когда требуется быстро ввести резерв.

Недостатки ручного включения синхронных машин способом точной синхронизации давно поставили вопрос о необходимости разработки блокировок от ошибочных действий персонала и об автоматизации самого процесса включения. Необходимость в таких улучшениях схемы особенно остро выявила в последние годы в связи с широкой автоматизацией гидроэлектростанций. Были разработаны и получили распространение автоматические синхронизаторы самых различных типов и конструкций.

Однако вопрос все же не был разрешен, так как автоматические синхронизаторы не обеспечивают быстрого включения генераторов на параллельную работу, сложны по своей конструкции и, что самое главное, они ненадежно работают в аварийных условиях, при снижении частоты и напряжения, когда особенно важно быстрое включение генераторов в сеть. В этих случаях мы вынуждены прибегать к ручному включению, не взирая на все его недостатки и возможные осложнения.

Применение предложенных различного рода блокировок при ручном включении не избавляет от ошибочных включений, вызванных неправильным присоединением цепей напряжения. В практике эксплуатации имели место случаи включения при сдвиге фаз генератора и сети в 180° несмотря на наличие блокировок от неправильных включений. Возможность такого включения объясняется тем, что цепи блокировки питаются

от тех же трансформаторов напряжения, что и синхронизационное устройство, поэтому блокировка не может предотвратить ошибочных включений при неправильном

присоединении цепей напряжения. Таким образом, автоматические синхронизаторы и блокировки от ошибочных включений не дали должного эффекта. Они привели к усложнению схем автоматики вместо того, чтобы упростить их.

Недостатки, присущие включению синхронных машин на параллельную работу по способу точной синхронизации, поставили вопрос о применении значительно более простого, давно известного способа самосинхронизации.

Будучи давно известен, этот способ все же долгое время не получал практического применения из-за опасения вредного влияния толчков тока включения как на сеть, так и на включаемую машину. Однако преимущества этого способа выявили целесообразность его широкого внедрения.

Способ самосинхронизации заключается в том, что синхронная машина разворачивается до скорости, незначительно отличающейся от синхронной, и без возбуждения включается в сеть, после чего ейдается возбуждение и она втягивается в синхронизм.

Способ самосинхронизации имеет ряд существенных преимуществ перед способом точной синхронизации.

1. Простота, практически исключающая возможность ошибочного включения, и отсутствие в связи с этим опасности повреждения машины.

2. Быстрота включения, что особенно важно во время ликвидации аварии.

3. Простота автоматизации процесса включения.

4. Возможность включения генератора при глубоких снижениях частоты и напряжения в сети.

5. Значительное упрощение включения генераторов, не имеющих автоматических регуляторов скорости, а также генераторов, лишенных средств дистанционного включения выключателя.

6. Значительное упрощение автоматизации процесса пуска и включения в сеть синхронных компенсаторов с разгонным двигателем.

7. Возможность быстрого автоматического включения на параллельную работу резервных гидрогенераторов с применением асинхронного пуска.

8. Возможность применения автоматического повторного включения электростанции, потерявшей связь с системой из-за нарушения устойчивости или при переходящем коротком замыкании на линии электропередачи, связывающей станцию с системой.

Весьма важно, что способ самосинхронизации принципиально дает возможность значительно упростить схемы автоматики. В качестве примера можно привести схему включения на параллельную работу синхронных компенсаторов и двигателей с применением прямого асинхронного пуска с глохом подключенным возбудителем. В этой схеме достигается полная автоматизация без использования какой-либо аппаратуры, специально разработанной для осуществления этой автоматизации.

Вместе с тем способу самосинхронизации свойственны следующие недостатки:

1. Неизбежный толчок тока в момент включения невозбужденной синхронной машины на напряжение сети.

2. Понижение напряжения сети в момент включения.

Преимущества способа самосинхронизации для включения синхронных машин на параллельную работу вполне очевидны, следует поэтому рассмотреть более подробно его недостатки с тем, чтобы определить область применения самосинхронизации.

Влияние толчка тока при самосинхронизации на машину. Многолетний опыт применения в эксплуатации асинхронного пуска крупных синхронных и асинхронных двигателей, по своей конструкции ничем не отличающихся от генераторов, показывает практическую безвредность для обмоток статора пусковых токов, в несколько раз (до 5...7) превышающих номинальный ток, при длительности процесса до 30...40 сек.

Безусловно, что в момент включения на параллельную работу по способу самосинхронизации синхронная машина подвергается меньшему воздействию, чем при асинхронном пуске, так как в первом случае длительность протекания пусковых токов во много раз меньше. К тому же согласно стандарту электрические машины обязаны выдерживать без вредных последствий ударный ток при коротком замыкании всех линейных зажимов непосредственно у машины в режиме холостого хода и при напряжении 105% номинального. Само собой разумеется, что при проектировании конструктор предусматривает некоторый запас механической прочности. И действительно, эксплуатации до сих пор неизвестны случаи повреждений обмоток статоров при коротких замыканиях непосредственно на выводах машины.

Безвредность многократных ударных токов коротких замыканий подтверждается следующим примером. Генератор нормальной и притом далеко не совершенной конструкции мощностью 22 000 ква после 15 лет эксплуатации использовали для проведения испытаний на короткое замыкание. Генератор выдержал несколько сот коротких замыканий на зажимах с начальным значением периодической составляющей, равным

семикратному номинальному току, и несколько тысяч более легких коротких замыканий. Никаких ненормальностей при этом не было отмечено.

Протекание переходных токов имеет место во всех машинах при любых коротких замыканиях в сети. Все машины как синхронные, так и асинхронные посыпают к месту короткого замыкания переходный ток. В асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором, пускаемым с переключением со звезды на треугольник или через автотрансформатор с перерывом тока, также характерны переходные токи. В то же время практика эксплуатации не знает случаев повреждения обмоток статоров переходными токами.

Между тем неоднократно регистрировались случаи повреждения обмоток статоров при пуске двигателей с фазным ротором с выведенным реостатом, хотя по величине пусковой ток практически равен переходному току в момент короткого замыкания вблизи двигателя. Очевидно, что дело не только в величине переходных токов, но и в их длительности.

При включении синхронной машины способом самосинхронизации ток статора затухает быстрее, чем при коротком замыкании, так как обмотка ротора в момент включения замкнута на сопротивление гашения поля. Более быстрому затуханию тока статора также способствует изменение скольжения, сопутствующее втягиванию машины в синхронизм.

Таким образом, следует считать, что нет серьезных оснований к ограничению кратности тока в момент включения синхронных машин способом самосинхронизации во всех случаях. Существующие в настоящее время ограничения не могут считаться технически обоснованными. По мере накопления опыта эксплуатации все ограничения способа самосинхронизации безусловно будут сняты.

Снижение напряжения в сети при включении машины по способу самосинхронизации. Рассмотрим теперь влияние понижения напряжения в сети в момент включения синхронной машины по способу самосинхронизации. Значительное снижение напряжения наблюдается в тех случаях, когда включается машина, соизмеримая по своей мощности с системой или даже превосходящая систему по мощности.

Явление это происходит следующим образом.

В момент включения синхронной машины способом самосинхронизации к шинам, к которым подключены другие генераторы и потребители, напряжение на этих шинах сразу падает до величины, определяемой соотношением сопротивления включаемой машины и системы. Затем напряжение восстанавливается до нормального значения. Чем быстрее протекает процесс восстановления напряжения, тем меньше скажется вредное влияние снижения напряжения на потребителей, получающих питание с шин, к которым приключается машина.

Даже весьма глубокое снижение напряжения не представляет какой-либо опасности, если напряжение быстро восстанавливается до нормального значения. Практика показала, что даже

тяжелые короткие замыкания в системах, отключаемые мгновенными защитами, проходят совершенно безболезненно при правильно настроенной защите потребителей.

При включении синхронных машин способом самосинхронизации напряжение восстанавливается сравнительно быстро. Форсировка возбуждения в значительной степени ускоряет процесс восстановления напряжения. Испытания показали практическую возможность включения по способу самосинхронизации на параллельную работу не только машин с системой соизмеримой мощности, но и значительно ее превосходящих. Таким образом, опыт показал допустимость включения на параллельную работу машин любой мощности.

Область применения способа самосинхронизации. Специально проведенные исследования и анализ опыта эксплуатации позволяют заключить, что единственным способом включения на параллельную работу машин мощностью до 3 000 квт должен быть способ самосинхронизации при любых схемах соединения и при любых соотношениях мощностей подключаемой машины и мощности системы [Л. 17].

Принято считать, что включение синхронных машин мощностью больше 3 000 квт способом самосинхронизации допускается в тех случаях, когда переходная составляющая тока статора в момент включения не превосходит 3,5-кратного значения номинального тока. Этому условию удовлетворяют практически все гидрогенераторы и синхронные компенсаторы с разгонным двигателем независимо от схемы присоединения их к шинам станции или подстанции и все турбогенераторы, работающие по схеме блока с повышающим трансформатором [Л. 1, 13, 20].

Есть все основания считать, что допустимая кратность тока при включении по методу самосинхронизации значительно больше 3,5, поэтому по мере накопления опыта эксплуатации область применения способа самосинхронизации будет расширяться.

В аварийных случаях можно включать по способу самосинхронизации все синхронные машины независимо от кратности тока включения.

По величине снижения напряжения в момент включения нет никаких ограничений по применению способа самосинхронизации.

Самосинхронизация синхронных компенсаторов. Для синхронных компенсаторов с разгонными электродвигателями ранее применялись сложные схемы включения на параллельную работу, в частности, схемы, в которых разгонный двигатель используется как автотрансформатор. Эти схемы содержат четыре выключателя и сложную автоматику.

Для разгонных двигателей с фазным ротором применялась схема синхронизации его при помощи постоянного тока, подаваемого в обмотку ротора.

Из ранее применявшихся, наиболее простой была схема включения компенсатора способом точной синхронизации при работе разгонного двигателя на подсинхронной скорости. Однако и этой схеме свойственны существенные недостатки: неверная работа схемы или реле может привести

к неправильному включению возбужденного компенсатора в сеть с большим расхождением угла сдвига фаз со всеми вытекающими отсюда последствиями. Кроме того, исключается возможность включения компенсатора в сеть при аварийных случаях и значительном снижении напряжения, так как при этом скольжение разгонного двигателя может значительно увеличиться и включение в сеть может произойти при недопустимо большом угле расхождения между напряжением сети и э. д. с. компенсатора.

Применение способа самосинхронизации для включения компенсаторов на параллельную работу позволяет значительно упростить автоматизацию всего процесса пуска и исключает возможность ошибочного включения компенсаторов в сеть.

Автоматическое повторное включение линии и генераторов. Способ самосинхронизации открывает новые возможности в части ускорения включения в работу генераторов электростанции, выдающей преимущественно энергию в систему при потере связи с системой. При потере связи такой электростанции с системой обратное включение ее на параллельную работу дежурным персоналом по способу точной синхронизации иногда затягивается на десятки минут. Такая задержка в условиях дефицита мощности совершенно недопустима.

При отсутствии резерва в системе отключение электростанции приводит к снижению частоты и отключению части потребителей автоматами разгрузки по частоте. Применение автоматической точной синхронизации в таких случаях усложняет схему, замедляет включение при качаниях и может привести к отказу автоматики при снижении частоты и напряжения в системе.

Сочетанием способа самосинхронизации с автоматическим повторным включением (АПВС) можно обеспечить быстрое автоматическое повторное включение электростанции с несколькими генераторами, потерявшими связь с системой вследствие отключения линии электропередачи.

Особенно просто автоматическое повторное включение линии с генераторами можно осуществить для электростанций, выдающих всю мощность в энергосистему. В тех случаях, когда электростанция имеет местных потребителей, следует выделять только часть генераторов для включения их в систему, оставляя остальные генераторы станции для питания местных потребителей.

Применение автоматического повторного включения «линия — генераторы» возможно как для гидростанций, так и для тепловых электростанций. При отключении линии электропередачи одновременно дается импульс на отключение автоматов гашения поля у генераторов. Отключившаяся линия включается автоматически повторно со стороны системы. Для осуществления автоматического повторного включения генераторов со стороны электростанции необходимо соблюдение следующих условий: наличие напряжения на линии, снижение напряжения на генераторах до $(0,1 \dots 0,2) U_n$ и уменьшение скорости

вращения генераторов до приемлемого значения. На последнем условии следует остановиться несколько подробнее.

Для гидростанции при сбросе нагрузки скорость вращения генератора сравнительно быстро достигает максимальной (порядка 1,3 n_n), снижаясь до установившегося значения. При полном сбросе нагрузки скорость достигает установившейся, спустя довольно продолжительное время, порядка от 10 до 40 сек. Поэтому весьма важно осуществить автоматическое повторное включение раньше, чем гидрогенераторы достигнут установленной скорости. Опыты, проведенные в Узбекэнерго и в Севкавказэнерго, показали, что вполне можно производить автоматическое повторное включение на спаде кривой скорости вращения при скорости выше номинальной на 10...15%. Есть основания предполагать, что можно будет производить включение еще раньше. При этом возбуждение следует подавать не одновременно с включением машины, а с некоторой выдержкой времени.

Для турбогенераторов скорость вращения при сбросе полной нагрузки не превышает 1,08...1,09 от номинальной, и поэтому время автоматического повторного включения может быть значительно меньше, и оно будет практически определяться временем гашения поля.

В целях осуществления быстрого уменьшения напряжения на генераторе после отключения линии и сбросе нагрузки следует внедрить схемы гашения поля с более интенсивным гашением. Весьма благоприятные результаты дает применение нелинейных сопротивлений типа вилита.

Применение автоматического повторного включения «линия — генераторы» значительно повысит надежность работы энергосистем. Отключавшаяся генерирующая мощность сможет быть включена обратно примерно через несколько секунд. Особенно эффективным этот способ представляется для гидроэлектростанций, работающих на дальние линии электропередачи.

В настоящее время АПВС находится в эксплуатации и монтируется на ряде линий.

Автоматический пуск резервных гидрогенераторов с применением асинхронного пуска. Для повышения надежности работы систем весьма большой интерес представляет автоматический пуск резервных гидрогенераторов при аварийном снижении частоты в системе. При этом пуск осуществляется при снижении частоты до определенного предела. Впервые такой пуск реализовали на Днепрогэсе по инициативе работников этой станции.

Но такой пуск не может удовлетворить требованиям обеспечения всех потребителей электроэнергией при аварийном снижении частоты в системе, вызванном внезапной потерей активной мощности. Как известно, снижение частоты в таких случаях происходит довольно быстро с постоянной времени порядка 3...6 сек. Между тем время пуска даже полностью автоматизированного гидрогенератора требует порядка 1...2 мин и, естественно, встает вопрос об уменьшении времени пуска резервного гидрогенератора. Этого можно

достичь путем применения асинхронного пуска и подачи импульса при включении гидрогенератора не по абсолютной величине частоты, а по скорости ее изменения. Пуск резервного гидрогенератора в этом случае производится следующим образом.

В момент отключения генерирующей мощности, до того как частота успеет сколько-нибудь заметно снизиться, от устройства, реагирующего на скорость изменения частоты,дается импульс на открытие направляющего аппарата и одновременно генератор включается на напряжение сети.

Под дополнительным воздействием асинхронного момента время пуска значительно сокращается. Генератор увеличивает свою скорость, возбуждается, втягивается в синхронизм и набирает сразу активную и реактивную нагрузки. Дополнительным преимуществом такого комбинированного пуска является полный отказ от устройства синхронизации. Для того чтобы такой способ пуска гидрогенераторов был эффективным, необходимо, чтобы генератор имел достаточный асинхронный момент.

Влияние асинхронного момента на самосинхронизацию. Как было показано выше, асинхронный момент благоприятно влияет на процесс втягивания синхронной машины при включении ее на параллельную работу способом самосинхронизации. Чем больше асинхронный момент, тем скорее происходит этот процесс. Чем больше асинхронный момент, тем при большем скольжении можно включать машину.

На вопросе о влиянии асинхронного момента следует остановиться несколько более подробно.

Синхронная машина с достаточным асинхронным моментом имеет ряд преимуществ в эксплуатации. Для того чтобы синхронная машина имела достаточный асинхронный момент, ее необходимо снабдить успокоительными контурами по продольной и поперечной осям ротора. Наличия успокоительных контуров только в продольной оси недостаточно.

Турбогенераторы с массивными роторами развиваются весьма значительный асинхронный момент и без специальной успокоительной обмотки, а за счет токов, индуцируемых в стали ротора. Весьма важно, что турбогенераторы имеют мощные успокоительные контуры и в поперечной оси. Благодаря тому, что турбогенераторы развивают достаточный асинхронный момент за счет токов, индуцируемых в стали ротора, у этих машин нет необходимости в устройстве специальной успокоительной обмотки. Поэтому наши отечественные заводы уже давно отказались от применения таких обмоток для турбогенераторов.

Только иностранные фирмы до сих пор изготавливают турбогенераторы, снабженные специальной успокоительной обмоткой. По причине неудачного их конструктивного выполнения эти обмотки быстро повреждаются и поэтому при первой же возможности их удаляют.

Совершенно иначе обстоит дело с гидрогенераторами — машинами с явно выраженным полюсами. При полюсах, выполненных из шихтованной стали, асинхронный момент весьма неве-

лик и машины нуждаются в специальной успокоительной обмотке. Эта обмотка выполняется в виде медных или латунных стержней, уложенных в верхней части полюсов ротора и замкнутых между собой. Кроме того, успокоительные обмотки, уложенные в полюса, соединяются специальными перемычками. Такая обмотка называется **п р о д о л ж н о - п о п е р е ч н о й у с п о к о и т е л ь н о й о б м о т к о й**. Успокоительная обмотка только в поперечной оси (без этих перемычек) действует значительно менее эффективно.

Какие же преимущества имеет синхронная машина с продольно-поперечной успокоительной обмоткой? Наличие продольно-поперечной успокоительной обмотки весьма значительно снижает так называемые динамические перенапряжения, наблюдающиеся при несимметричных коротких замыканиях на воздушной линии электропередачи. Эти перенапряжения при отсутствии продольно-поперечной успокоительной обмотки и определенных длинах воздушной линии вызывают весьма большие перенапряжения, достигающие до $4 \cdot U_n$.

Наличие продольно-поперечной успокоительной обмотки значительно повышает устойчивость работы генераторов при нарушениях динамической устойчивости. Выпавшая в результате короткого замыкания из синхронизма машина или группа машин успешно самосинхронизируется после отключения короткого замыкания.

Наличие продольно-поперечной успокоительной обмотки значительно облегчает втягивание машины в синхронизм при способе самосинхронизации. Это особенно важно в случае использования автоматического повторного включения линии с генераторами. Наличие продольно-поперечной успокоительной обмотки дает также возможность осуществлять быстрое включение в работу резервных гидрогенераторов путем применения асинхронного пуска. Наконец, наличие продольно-поперечной успокоительной обмотки позволяет просто и надежно включать на параллельную работу генераторы, работающие через длинные линии электропередачи при отсутствии шунтирующих реакторов.

Как показал опыт эксплуатации, машины, снабженные успокоительной обмоткой, работают надежно. Повреждения успокоительных обмоток имели место только у некоторых генераторов иностранных фирм.

Учитывая изложенное, следует при заказе гидрогенераторов требовать изготовления их с продольно-поперечной успокоительной обмоткой, так как согласно ГОСТ 5616-50 заводы обязаны по требованию заказчика выполнять гидрогенераторы с успокоительной обмоткой.

Следует отметить весьма большую важность применения способа самосинхронизации для малой энергетики. В ряде случаев только применение этого способа дало возможность осуществить параллельную работу генераторов, ранее работающих раздельно.

Способ самосинхронизации применим для генераторов с любыми первичными двигателями:

локомобильным, дизельным, гидравлическим, паротурбинным и т. д.

Результаты испытаний. На электростанциях с генераторами различной мощности проведено большое число испытаний по включению генераторов на параллельную работу способом самосинхронизации. Целью этих испытаний было определение толчка тока и снижения напряжения в момент включения генератора в сеть и длительности процесса втягивания в синхронизм. Кроме этого, ряд испытаний был проведен для определения допустимого соотношения мощности включаемого генератора с мощностью системы.

Рассмотрим результаты некоторых испытаний для турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов.

В мае 1948 г. впервые в Советском Союзе были проведены включения способом самосинхронизации турбогенератора 50 000 квт, 1 500 об/мин, работающего в блоке с трансформатором на сеть 110 кв, при скольжении, близком к нулю, и при скольжении $s = 5\%$. Генератор даже без подачи возбуждения втягивался в синхронизм за счет реактивного момента. Периодическая составляющая тока статора была невелика и составляла 2,13 номинального.

Затем было произведено включение того же генератора при скольжении $s = +1,4\%$ и подаче возбуждения после включения генератора в сеть. Толчок периодической составляющей тока статора составил всего лишь 1,66 номинального тока статора, напряжение на шинах 110 кв снижалось не более чем на 8%. Процесс синхронизации заканчивался за время порядка 1...2 сек.

При включении генератора мощностью 24 000 квт, работающего со скольжением $s = 2\%$, в блоке с трансформатором на сеть 110 кв толчок статора не превышал $2 \cdot I_n$, снижение напряжения на шинах 110 кв было порядка 10%. Напряжение восстанавливалось до $0,95 \cdot U_n$ за 1 сек.

Были проведены испытания по включению турбогенератора мощностью 12 000 квт, работающего на общие шины, к которым подключены два таких же генератора. Связь с системой была осуществлена на напряжение 35 кв. Испытания показали, что кратность периодической составляющей тока статора не превосходила 3,5. В момент включения напряжение на шинах генераторного напряжения снижалось не более чем на 20% и восстанавливалось до $0,95 U_n$ за время не более 1 сек.

Для генераторов, мощностью менее 3 000 квт, применение способа самосинхронизации в ряде случаев дало возможность впервые осуществить их параллельную работу.

Способ самосинхронизации дал весьма хорошие результаты в применении к генераторам небольшой мощности с локомобильным, дизельным и газогенераторным первичными двигателями. На одной электростанции четыре дизель-генератора (мощностью 120 ква три генератора и 250 ква один генератор) 17 лет работали раздельно, а с 1951 г. работают параллельно, что

осуществляется путем включения их по способу самосинхронизации.

Были проведены испытания по включению турбогенератора на параллельную работу с турбогенератором равной ему мощности. Паспортные данные турбогенераторов: 9 300 ква, 6,3 кв, 850 а. Напряжение в момент включения снижалось до 0,58 номинального и за 1 сек. восстанавливалось до 0,8 от номинального. Ток статора в момент включения был равен номинальному току. При включении турбогенератора 8 000 ква на параллельную работу с турбогенератором 1 500 ква напряжение в момент включения составило 0,31 номинального и восстановилось до 0,95 от номинального за время 3,8 сек. Ток статора в момент включения был в 2 раза меньше номинального.

Проведенные аналогичные испытания с генераторами показали, что практически допустимо включение на параллельную работу способом самосинхронизации генераторов при любом соотношении мощностей включаемого генератора и мощности системы.

При включении в сеть способом самосинхронизации компенсатора мощностью 15 000 ква, 6,6 кв, 1 310 а, 750 об/мин симметричный ток в момент включения не превышал 1,2 номинального. Напряжение на шинах подстанции в момент включения снижалось до 0,65 номинального и восстанавливалось за 4...5 сек.

В одной энергосистеме были проведены испытания АПВС для электростанций с генератором 8 500 ква, 6,3 кв, 6 400 квт, 750 об/мин (№ 1) и для электростанции с гидрогенератором 10 000 ква, 6,6 кв, 8 000 квт, 250 об/мин (№ 2).

На электростанции № 1 АПВС было произведено после сброса номинальной мощности генератора. Импульс на МРО был подан в момент отключения выключателя генератора. Обратное включение произведено вручную при разности частот 2,7 пер/сек. Полный цикл АПВС занял 15 сек. Генератор втянулся быстро и без качаний. На электростанции № 2 АПВС было произведено после сброса нагрузки, равной 0,75 номинальной. Импульс на МРО был подан через 15 сек после отключения выключателя. Обратное включение было произведено от реле при разности частот 1,1 гц. Полный цикл АПВС занял 25 сек. Генератор втянулся в синхронизм с небольшими качаниями.

На одной гидростанции были проведены опыты по пуску и включению гидрогенератора 3 500 ква, 6,3 кв, 250 об/мин с неподвижного состояния. Включение производилось в момент начала вращения вала агрегата. Полное время разгона и втягивания генератора в синхронизм уменьшилось с 15 сек при обычном пуске до 6 сек. Ток статора в момент включения составил $2,8 \cdot I_n$. Ротор генератора имел успокоительную обмотку в продольной оси.

Опыт применения способа самосинхронизации. Включение синхронных машин на параллельную работу способом самосинхронизации находит все большее применение. В Белоруссэнерго уже несколько лет на всех электростанциях системы

способ самосинхронизации принят как нормальный способ включения генераторов на параллельную работу. В энергосистемах Урала на двух электростанциях способ самосинхронизации применяется как нормальный способ для восьми генераторов мощностью 50 000 квт.

В Извэнерго несколько лет применяется способ самосинхронизации для четырех генераторов мощностью 25 000 квт и одного генератора мощностью 35 000 квт. На этой станции колонка для точной синхронизации демонтирована. Надо отметить, что большая часть генераторов этой станции находится в работе уже 20...35 лет и состояние изоляции лобовых частей этих генераторов неудовлетворительное. Однако во время очередных капитальных ремонтов генераторов никаких дефектов или ненормальностей в состоянии лобовых частей не было обнаружено.

К концу 1953 г. способ самосинхронизации был внедрен на 60 электростанциях и 11 подстанциях энергосистем Министерства электростанций. На этих электростанциях и подстанциях включаются способом самосинхронизации 156 генераторов и 15 синхронных компенсаторов. Общее число включений на некоторых гидрогенераторах исчисляется тысячами. Например, два гидрогенератора мощностью 15 000 ква, начиная с 1951 г., включались каждый более 2 500 раз.

Выводы. Включение синхронных генераторов и компенсаторов на параллельную работу способом самосинхронизации имеет безусловные преимущества перед способом точной синхронизации.

Способ самосинхронизации должен применяться на всех генераторах мощностью 3 000 квт и ниже; на всех гидрогенераторах и синхронных компенсаторах; на всех турбогенераторах, работающих в блоке с трансформаторами, и на всех турбогенераторах мощностью более 3 000 квт, работающих на общие шины, если симметричная составляющая переходного тока при включении способом самосинхронизации не превышает 3,5 номинального тока.

В аварийных случаях включение всех генераторов должно производиться способом самосинхронизации.

Есть все основания предполагать, что после проведения соответствующих научно-исследовательских работ и изучения опыта эксплуатации выявятся возможности более широкого применения способа самосинхронизации.

Литература

1. О грубой синхронизации генераторов. Решение технического отдела МЭС 14/Э 24. 2. 1948 г. Электрические станции, № 3, 1948.
2. Л. С. Линдорф. Включение в сеть синхронных компенсаторов с разгонным двигателем методом самосинхронизации. Электрические станции, № 3, 1949.
3. Г. С. Сафразбекян. Включение в сеть крупных гидрогенераторов методом самосинхронизации. Электрические станции, № 9, 1949.
4. Л. Г. Мамиконянц и И. А. Сыромятников. Включение синхронных генераторов на параллельную работу по методу самосинхронизации. Электрические станции, № 9, 1949.

5. Э. Г. Файнштейн. Самосинхронизация генератора средней мощности. Электрические станции, № 9, 1949.

6. В. П. Клецкий. Автоматическая самосинхронизация генераторов. Электрические станции, № 3, 1950.

7. Д. Л. Могилевкин. Опыты самосинхронизации синхронного компенсатора. Электрические станции, № 5, 1950.

8. М. Ю. Фрумкин. Включение турбогенераторов небольшой мощности методом самосинхронизации. Электрические станции, № 5, 1950.

9. И. И. Кодкинд. Самосинхронизация генераторов средней и малой мощности. Электрические станции, № 8, 1951.

10. А. М. Малахова и Ю. М. Элькинд. Схемы и устройства для самосинхронизации генераторов. Электрические станции, № 8, 1951.

11. И. Л. Пироговский и В. Л. Сольский. Полуавтоматическая самосинхронизация мощных турбогенераторов. Электрические станции, № 11, 1951.

12. Ю. М. Элькинд. Автоматическая самосинхронизация гидрогенераторов по сниженной разгонной характеристике. Электрические станции, № 3, 1952.

13. О внедрении самосинхронизации генераторов и компенсаторов в качестве нормального способа синхрони-

зации. Техническое управление МЭС. Электрические станции, № 4, 1952.

14. Г. Е. Туркия, Г. И. Цагарейшили и С. Р. Элькинд. Автоматическая самосинхронизация гидрогенераторов. Электрические станции, № 7, 1952.

15. Э. Г. Файнштейн. Самосинхронизация гидрогенераторов с агрегатом возбуждения. Электрические станции, № 7, 1952.

16. Г. Б. Якуша. Включение синхронного компенсатора способом самосинхронизации. Электрические станции, № 8, 1952.

17. И. И. Кодкинд. Совещание по вопросу включения синхронных генераторов способом самосинхронизации. Электрические станции, № 9, 1952.

18. А. Ф. Васильев. Применение самосинхронизации турбогенераторов. Электрические станции, № 4, 1953.

19. И. П. Александров и А. Ш. Фридлянд. Применение самосинхронизации синхронных генераторов в энергосистеме средней мощности. Электрические станции, № 9, 1953.

20. О внедрении способа самосинхронизации синхронных генераторов. Эксплуатационный циркуляр № 10/Э сентябрь 1953 г. Технического управления МЭСЭП. Электрические станции, № 12, 1953.

[20.4.1954]

◆ ◆ ◆

Электромагнитные моменты вращения синхронных машин при включении их в сеть способом самосинхронизации

Кандидат техн. наук Л. Г. МАМИКОНЯНЦ
ЦНИЭЛ МЭС СССР

Одним из наиболее важных вопросов, связанных с внедрением в практику эксплуатации включения синхронных машин (генераторов и синхронных компенсаторов) на параллельную работу способом самосинхронизации, является вопрос о механических воздействиях, которым подвергаются машины при таких включениях. В настоящей статье рассматриваются величины электромагнитных моментов вращения, возникающих в синхронных

Рассматриваются электромагнитные моменты вращения, возникающие в синхронных машинах с успокоительными обмотками на роторе и без них при включении в сеть способом самосинхронизации. Сопоставляются моменты при самосинхронизации с моментами, возникающими при коротких замыканиях и при включении на сеть возбужденных синхронных машин с большими углами рассогласования фаз напряжений сети и машины.

машинах в начальный период времени после включения их в сеть способом самосинхронизации.

При включении по способу самосинхронизации синхронные машины

включаются в сеть без возбуждения, и при этом скорость вращения ротора во время включения может быть несколько отличной от синхронной. Возникающий при этих условиях включение момент вращения можно выразить следующей формулой¹:

$$\begin{aligned}
 m_{ee} = U^2 \left(-\frac{s[(T_{do}' - T_d')(1 + s^2 T_{do}'' T_d'') + (T_{do}'' - T_d'')(1 + s^2 T_{do}' T_d')]}{2x_d (1 + s^2 T_d'^2) (1 + s^2 T_d''^2)} - \frac{s(T_{qo}'' - T_q'')}{2x_q (1 + s^2 T_q'^2)} - \right. \\
 - \frac{1}{2x_d} \sqrt{\frac{(1 + s^2 T_{do}'^2) (1 + s^2 T_{do}''^2)}{(1 + s^2 T_d'^2) (1 + s^2 T_d''^2)}} \sin(2\delta_o - \alpha_d - 2st) + \frac{1}{2x_q} \sqrt{\frac{1 + s^2 T_{qo}''^2}{1 + s^2 T_q'^2}} \sin(2\delta_o - \alpha_q - 2st) - \\
 - \left\{ \left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right) \frac{T_d' e^{-\frac{t}{T_d'}}}{\sqrt{(1 + s^2 T_d'^2) [1 + (1 - s)^2 T_d''^2]}} \cos(\delta_o + \beta_d') + \right. \\
 \left. + \left(\frac{1}{x_q''} - \frac{1}{x_d} \right) \frac{T_d'' e^{-\frac{t}{T_d''}}}{\sqrt{(1 + s^2 T_d''^2) [1 + (1 - s)^2 T_d''^2]}} \cos(\delta_o + \beta_d'') \right\} \sin(\delta_o - st) +
 \end{aligned}$$

¹ Принятые обозначения приведены в конце статьи.

$$\begin{aligned}
& + \left(\frac{1}{x_q''} - \frac{1}{x_q} \right) \frac{T_q'' e^{-\frac{t}{T_q''}}}{V \frac{(1+s^2 T_q''^2)[1+(1-s)^2 T_q''^2]}{(1+s^2 T_d''^2)[1+(1-s)^2 T_d''^2]}} \sin(\delta_o + \beta_q) \cos(\delta_o - st) + \\
& + (1-s) \left\{ \frac{(T_{do}' - T_d')[1+(1-s)^2 T_{do}'' T_d''] + (T_{do}'' - T_d'')[1+(1-s)^2 T_{do}' T_d']}{2x_d [1+(1-s)^2 T_d'']^2 [1+(1-s)^2 T_d''^2]} + \frac{T_{go}'' - T_q''}{2x_q [1+(1-s)^2 T_q''^2]} \right\} e^{-\frac{2t}{T_a}} - \\
& - \left\{ \frac{1}{2x_d} \sqrt{\frac{[1+(1-s)^2 T_{do}''^2][1+(1-s)^2 T_{do}''^2]}{[1+(1-s)^2 T_d''^2][1+(1-s)^2 T_d''^2]}} \sin[2\delta_o + \xi_d + 2(1-s)t] - \frac{1}{2x_q} \sqrt{\frac{1+(1-s)^2 T_{go}''^2}{1+(1-s)^2 T_q''^2}} \sin[2\delta_o + \right. \\
& \left. + \xi_q + 2(1-s)t] \right\} e^{-\frac{2t}{T_a}} + \left\{ \frac{1}{x_d} \sqrt{\frac{[1+(1-s)^2 T_{do}''^2][1+(1-s)^2 T_{do}''^2]}{[1+(1-s)^2 T_d''^2][1+(1-s)^2 T_d''^2]}} \sin(\delta_o - st) \cos[\delta_o + \xi_d + (1-s)t] + \right. \\
& + \frac{1}{x_d} \sqrt{\frac{(1+s^2 T_{do}''^2)(1+s^2 T_d''^2)}{(1+s^2 T_d''^2)(1+s^2 T_d''^2)}} \cos(\delta_o - \alpha_d - st) \sin[\delta_o + (1-s)t] - \\
& - \frac{1}{x_q} \sqrt{\frac{1+(1-s)^2 T_{go}''^2}{1+(1-s)^2 T_q''^2}} \cos(\delta_o - st) \sin[\delta_o + \xi_q + (1-s)t] - \\
& - \frac{1}{x_q} \sqrt{\frac{1+s^2 T_{go}''^2}{1+s^2 T_q''^2}} \sin(\delta_o - \alpha_q - st) \cdot \cos[\delta_o + (1-s)t] \left. \right\} e^{-\frac{t}{T_a}} + \\
& + \left\{ \left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right) \frac{T_d' e^{-\frac{T_d' + T_a}{T_d' \cdot T_a} t}}{V \frac{(1+s^2 T_d''^2)[1+(1-s)^2 T_d''^2]}{(1+s^2 T_d''^2)[1+(1-s)^2 T_d''^2]}} \cos(\delta_o + \beta_d') + \right. \\
& + \left. \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d'} \right) \frac{T_d'' e^{-\frac{T_d'' + T_a}{T_d'' \cdot T_a} t}}{V \frac{(1+s^2 T_d''^2)[1+(1-s)^2 T_d''^2]}{(1+s^2 T_d''^2)[1+(1-s)^2 T_d''^2]}} \cos(\delta_o + \beta_d'') \right\} \sin[\delta_o + (1-s)t] - \\
& - \left(\frac{1}{x_q''} - \frac{1}{x_q} \right) \frac{T_q'' e^{-\frac{T_q'' + T_a}{T_q'' \cdot T_a} t}}{V \frac{(1+s^2 T_q''^2)[1+(1-s)^2 T_q''^2]}{(1+s^2 T_q''^2)[1+(1-s)^2 T_q''^2]}} \sin(\delta_o + \beta_q) \cos[\delta_o + (1-s)t] \Bigg). \quad (1)
\end{aligned}$$

Здесь

$$\alpha_d = \operatorname{arctg} s \frac{(1+s^2 T_{do}' T_d')(T_{do}'' - T_d'') + (1+s^2 T_{do}'' T_d')(T_{do}' - T_d')}{(1+s^2 T_{do}' T_d')(1+s^2 T_{do}'' T_d'') - s^2 (T_{do}' - T_d')(T_{do}'' - T_d'')}, \quad (2)$$

$$\beta_d' = \operatorname{arctg} \frac{1+s(1-s)T_d'^2}{(1-2s)T_d'}; \quad (3) \quad \beta_d'' = \operatorname{arctg} \frac{1+s(1-s)T_d''^2}{(1-2s)T_d''}; \quad (4)$$

$$\xi_d = \operatorname{arctg} (1-s) \frac{[1+(1-s)^2 T_{do}' T_d'](T_{do}'' - T_d'') + [1+(1-s)^2 T_{do}'' T_d'](T_{do}' - T_d')}{[1+(1-s)^2 T_{do}' T_d'][1+(1-s)^2 T_{do}'' T_d''] - (1-s)^2 (T_{do}' - T_d')(T_{do}'' - T_d'')}. \quad (5)$$

$$\alpha_q = \operatorname{arctg} \frac{s(T_{go}'' - T_q'')}{1+s^2 T_{go}'' T_q''}; \quad (6) \quad \xi_q = \operatorname{arctg} \frac{(1-s)(T_{go}'' - T_q'')}{1+(1-s)^2 T_{go}'' T_q''}. \quad (8)$$

$$\beta_q = \operatorname{arctg} \frac{1+s(1-s)T_q'^2}{(1-2s)T_q''}; \quad (7)$$

Формула получена на основании известного общего выражения момента вращения синхронной машины [Л. 1]

$$m = \psi_d i_q - \psi_q i_d, \quad (9)$$

путем подстановки в него выражений потокосцеплений и токов, найденных из общих операторных уравнений синхронной машины, составленных применительно к условиям, имеющим место при включении в сеть способом самосинхронизации [Л. 2].

При выводе формулы были приняты следующие условия: 1) машина не насыщена; 2) скольжение неизменно; 3) активное сопротивление статора равно нулю; его действие учитывалось

лишь введением множителя $e^{-\frac{t}{T_a}}$ в составляющие момента, зависящие от апериодических составляющих тока статора; 4) скольжение положительно при скорости ниже синхронной (режим двигателя); 5) момент вращения положителен при торможении (режим генератора); 6) внешние сопротивления включены в параметры генератора.

В формуле момента вращения (1) первые четыре слагаемые образуют момент установившегося режима, складывающийся из постоянной составляющей (первое и второе слагаемые) и знакопеременной составляющей (третье и четвертое слагаемые), изменяющейся с двойной частотой скольжения. Постоянная составляющая определяет так называемый средний асинхронный момент при асинхронном режиме. Знакопеременная составляющая обусловлена одноосными контурами по продольной и по поперечной осям ротора. При этом знакопеременные составляющие момента вращения, созданные токами в продольных контурах ротора, с одной стороны, и в поперечных контурах ротора, — с другой, имеют различные знаки. Поэтому при симметричном в магнитном и в электрическом отношении роторе и сумма их будет равна нулю. Наличие на роторе продольно-поперечной успокоительной обмотки или массивной бочки ротора (у турбогенераторов) уменьшает степень несимметрии и поэтому приводит к уменьшению и результирующей знакопеременной составляющей момента вращения.

Следующие три слагаемые, затухающие с постоянными времени T_d' , T_d'' и T_q'' соответственно и изменяющиеся с частотой скольжения, обусловлены взаимодействием основного синхронного вращающегося магнитного поля статора с магнитными полями ротора, созданными затухающими апериодическими свободными составляющими токов контуров ротора. Наибольшие значения эти составляющие имеют при включении машин в сеть с нулевым скольжением. При возрастании скольжения все три составляющие момента вращения довольно быстро уменьшаются.

Составляющие момента вращения, затухающие с постоянной времени $\frac{T_a}{2}$, обусловлены взаимодействием неподвижного магнитного поля, созданного апериодическими составляющими токов статора с индуцированными этим полем периодическими токами в контурах ротора, имеющими частоту $50(1-s)$ гц.

Апериодическая составляющая момента, складывающаяся в свою очередь из двух составляющих, соответствует потерям в контурах ротора от индуцированных в них токов с частотой $50(1-s)$ гц. Периодическая составляющая момента, также складывающаяся из двух составляющих, обусловлена (как и периодическая составляющая момента установившегося асинхронного режима) наличием одноосных, в общем случае неодинаковых контуров по продольной и поперечной осям на роторе. При наличии успокоительных контуров по обеим осям машины результирующая периодическая составляющая момента, имеющая частоту $100(1-s)$ гц, будет меньше, чем у машин без успокоительных контуров.

Все остальные составляющие момента вращения имеют частоту, близкую к 50 гц. При этом составляющие момента вращения, затухающие с постоянной времени T_a , обусловлены взаимодействием неподвижного поля, созданного апериодическими составляющими токов статора, с магнитными полями, созданными периодическими токами частоты скольжения, индуцированными в контурах ротора. Последние три составляющие момента вращения, затухающие с постоянными временем: $\frac{T_d'T_a}{T_d'+T_a}$; $\frac{T_d''T_a}{T_d''+T_a}$; $\frac{T_q''T_a}{T_q''+T_a}$, соответственно обусловлены взаимодействием неподвижного магнитного поля, созданного апериодическими составляющими токов статора и вращающимися вместе с ротором магнитными полями, созданными апериодическими свободными составляющими токов в контурах ротора.

Как показывают расчеты (см. ниже), в кривой момента вращения, действующего на машину после включения ее в сеть способом самосинхронизации, в начальный период (до затухания апериодических составляющих токов статора) наиболее сильно выражены знакопеременные составляющие, имеющие частоту 50 гц. При наличии на роторе продольно-поперечных успокоительных контуров благодаря уменьшению степени несимметрии ротора составляющие момента вращения частоты порядка 50 гц так же, как и другие рассмотренные выше знакопеременные составляющие, будут меньше, чем при отсутствии успокоительных контуров.

Наиболее четко положительное влияние фактора уменьшения магнитной и электрической несимметрии ротора на величину момента вращения при самосинхронизации можно видеть, приняв, что контуры ротора являются сверхпроводниками; при этом момент вращения будет выражаться следующей простой формулой:

$$m_{cc} = U^2 \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_q''} \right) \left\{ e^{-\frac{t}{T_a}} \cdot \sin [2\delta_0 + (1-2s)t] - \right. \\ \left. - \frac{1}{2} e^{-\frac{2t}{T_a}} \sin 2[\delta_0 + (1-s)t] - \frac{1}{2} \sin 2(\delta_0 - st) \right\}. \quad (10)$$

Из этой формулы видно, что чем меньше разница значений сверхпереходных реактивных сопротивлений по продольной и поперечной осям машины, т. е. чем совершеннее успокоительная система на роторе, тем меньший момент вращения действует на машину в первые несколько периодов после включения ее в сеть способом самосинхронизации. В пределе, при идеальной успокоительной системе, обеспечивающей равенство x_q'' и x_d'' , момент будет равен нулю. Физически это объясняется тем, что при сверхпроводящем симметричном роторе результирующее магнитное поле, созданное протекающими в нем токами, будет в любой момент времени компенсировать магнитное поле, созданное токами в статоре, угол между этими полями будет равен нулю, а следовательно, нулю будет равен момент вращения. Естественно, конечно, что такой случай представляет лишь чисто теоретический интерес.

Таким образом, применение на гидрогенераторах продольно-поперечных успокоительных обмоток, что соответствует технической политике по этому вопросу, проводимой в последние годы Техническим управлением МЭС, целесообразно не только с точки зрения улучшения условий вхождения машин в синхронизм при самосинхронизации [Л. 3, 4], но также в целях уменьшения начальных значений действующих при этом на машину моментов вращения.

Формула (10), позволяющая качественно проанализировать влияние успокоительных обмоток на момент вращения, возникающий при самосинхронизации таких машин, однако, непригодна для определения величины и характера изменения во времени действующего момента вращения. Расчеты по формуле (10) дают меньшие, чем действительные, значения момента вращения. Это объясняется тем, что формула (10) не учитывает быстрого затухания сверхпереходных составляющих токов, а также относительно большого активного сопротивления успокоительной обмотки. Последнее остается справедливым и для массивной бочки турбогенераторов, так как речь идет об активном сопротивлении при частоте порядка 50 гц.

Для машин без успокоительных контуров на роторе благодаря относительно малому активному сопротивлению обмотки возбуждения и соответственно медленному затуханию свободных токов в этой обмотке в первые несколько периодов после включения машины в сеть явления протекают аналогично явлениям в машинах со сверхпроводящими контурами на роторе. Поэтому для таких машин формула (10) дает достаточно точные количественные результаты и может быть использована для анализа влияния различных факторов на величину и характер возникающих при самосинхронизации моментов вращения. При этом предполагается, конечно, что речь идет о времени не более 0,1...0,15 сек после включения машины в сеть; этого вполне достаточно, ибо у машин без успокоительных контуров на роторе максимальное значение момента вращения воз-

никает именно в первый период, в дальнейшем момент быстро затухает.

Из формулы (10) следует, что максимальные моменты вращения будут иметь место при включении машины без успокоительных контуров на роторе с углом $\delta_o = 45^\circ, 135^\circ, 225^\circ$ и т. д. Пренебрегая затуханием апериодических составляющих токов статора, получим для максимального момента вращения при самосинхронизации следующее выражение:

$$m_{cc.m} \approx 2 \frac{U^2}{x_d'} \left(1 - \frac{x_d'}{x_q'} \right). \quad (11)$$

Здесь, как и выше, сопротивление внешней цепи включено в сопротивления x_d' и x_q' .

Из формулы (11) видно, что момент вращения при самосинхронизации через внешнее сопротивление будет убывать с ростом сопротивления не только за счет возрастания x_d' , но также вследствие уменьшения относительного различия в значениях x_d' и x_q' .

Результаты расчетов. В целях сопоставления моментов вращения, возникающих при самосинхронизации машин с успокоительными контурами на роторе и без них, а также сопоставления с моментами вращения, возникающими при других режимах (внезапном коротком замыкании, ошибочной синхронизации возбужденной машины), были проведены сравнительные расчеты².

Расчеты производились для гидрогенератора со следующими параметрами:

$$x_d = 0,718; \quad x_q = 0,585; \quad x_d' = 0,282;$$

$$x_d'' = 0,2; \quad x_q'' = 0,21;$$

$$T_{do}' = 1320 \text{ рад. эл.}; \quad T_{do}'' = 19,4 \text{ рад. эл.};$$

$$T_{qo}'' = 40,2 \text{ рад. эл.}$$

Для случая отсутствия успокоительных контуров на роторе принимался такой же гидрогенератор, но исключались параметры, соответствующие сверхпереходному режиму.

При включении генератора на сеть через трансформатор полагалось, что мощность трансформатора равна мощности генератора, а

$$e_\kappa \% = 14,3\%.$$

Расчеты кривых момента вращения при самосинхронизации для машин с успокоительными контурами на роторе производились по формуле (1); для машин без успокоительных контуров на роторе — как по формуле (1), так и по упрощенной формуле (10), дающей для таких машин, как указывалось, практически точные результаты.

² Инженером А. С. Пальцевой.

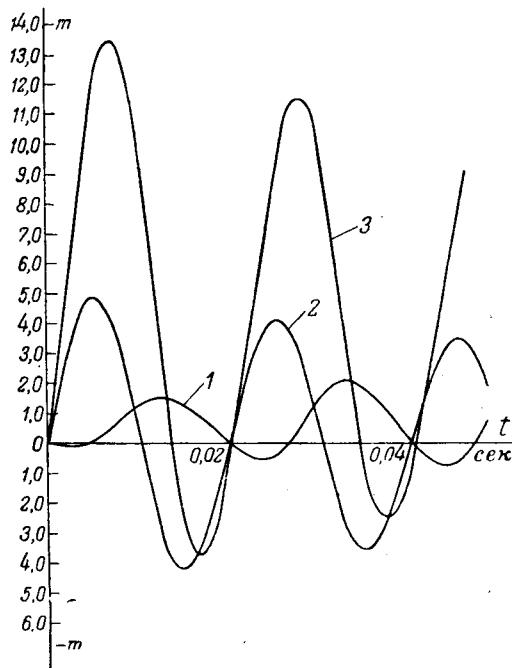


Рис. 1. Моменты вращения гидрогенератора с успокоительными контурами на роторе при различных режимах. 1 — при самосинхронизации и $s = 0$, $\delta_o = 135^\circ$; 2 — при внезапном трехфазном коротком замыкании; 3 — при включении в сеть в возбужденном состоянии при $s = 0$ и $\delta_o = 135^\circ$.

На рис. 1 для генератора с успокоительной обмоткой на роторе приведены³ кривые моментов вращения при самосинхронизации, внезапном трехфазном коротком замыкании и включении в сеть возбужденного до номинального напряжения генератора с углом $\delta_o = 135^\circ$. Внешнее сопротивление во всех случаях принято равным нулю (включение непосредственно на мощную сеть). Напряжение на зажимах генератора до короткого замыкания и напряжение сети приняты равными номинальному значению.

Из сопоставления приведенных на рис. 1 кривых видно, что даже при непосредственном (без трансформатора) включении на сеть способом самосинхронизации гидрогенератора с успокоительной обмоткой на роторе в первые периоды возникает момент вращения, существенно меньший, чем при внезапном коротком замыкании и тем более при неудачном включении возбужденной машины. В последнем случае момент вращения больше тридцатикратного значения и более чем в 2,5 раза превышает момент вращения при внезапном трехфазном коротком замыкании на зажимах машины. Такие большие вращающие моменты, очевидно, могут представлять опасность для машин.

Более полное представление о характере изменения момента вращения при самосинхронизации машины с успокоительными контурами на роторе дают кривые, приведенные на рис. 2. Кривые построены для того же генератора, но при вклю-

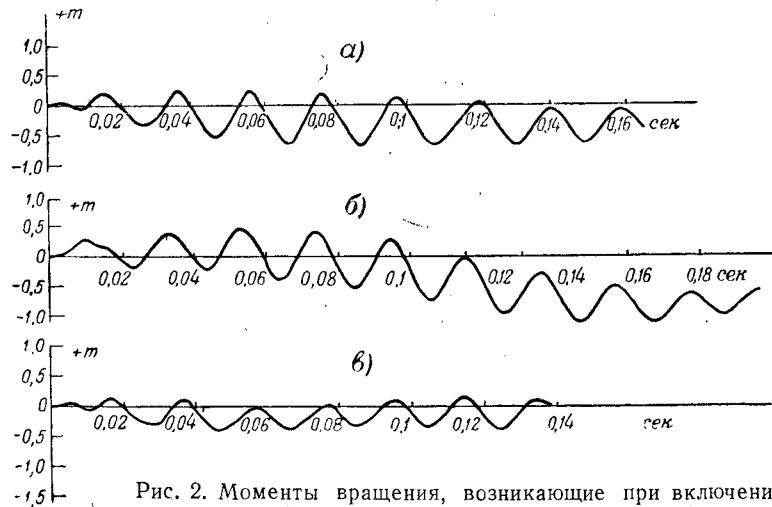


Рис. 2. Моменты вращения, возникающие при включении в сеть способом самосинхронизации через трансформатор гидрогенератора с продольно-поперечной успокоительной обмоткой на роторе.

а — при $s = 0$, $\delta_o = 45^\circ$; б — при $s = 0,05$, $\delta_o = 0$; в — при $s = 0,05$, $\delta_o = 45^\circ$.

чении его в сеть не непосредственно, а через трансформатор равной мощности, имеющий $e_k = 14,3\%$. Как видно из рис. 2, б, периодическая составляющая момента частоты порядка 50 Гц вначале несколько возрастает, а потом уменьшается; примерно через 10—12 периодов (0,2..0,25 сек) момент содержит практически только постоянные и медленно изменяющиеся составляющие.

Расчеты показали, что максимальные моменты вращения при самосинхронизации у машин с успокоительными контурами на роторе почти не зависят от начального скольжения⁴ и от начального значения угла δ_o .

На рис. 3 приведены кривые моментов вращения при самосинхронизации, внезапном трехфазном коротком замыкании и неудачном включении возбужденного генератора ($\delta_o = 135^\circ$) в случае отсутствия успокоительных контуров на роторе. При расчетах приняты те же условия, что и для кривых рис. 1.

На рис. 4 приведены кривые изменения во времени момента вращения при включении способом самосинхронизации того же гидрогенератора без успокоительных контуров на роторе через трансформатор, имеющий $e_k = 14,3\%$.

Из сопоставления рис. 2 и рис. 4 видно, что при самосинхронизации у машины без успокоительных контуров на роторе возникает момент вращения, больший, чем у соответствующей машины с успокоительными контурами на роторе.

При отсутствии внешнего сопротивления момент вращения при самосинхронизации у машины без успокоительных контуров на роторе практически одинаков по амплитудному значению с моментом вращения при внезапном трехфазном коротком замыкании на зажимах машин. При включении через трансформатор момент вращения снижается (от 3,5 до 1,8 по отношению к но-

³ Формулы для определения моментов вращения при внезапном коротком замыкании и неудачной синхронизации возбужденной машины здесь не приводим, как известные [Л. 5].

⁴ Расчеты производились для скольжений от 0 до 0,05.

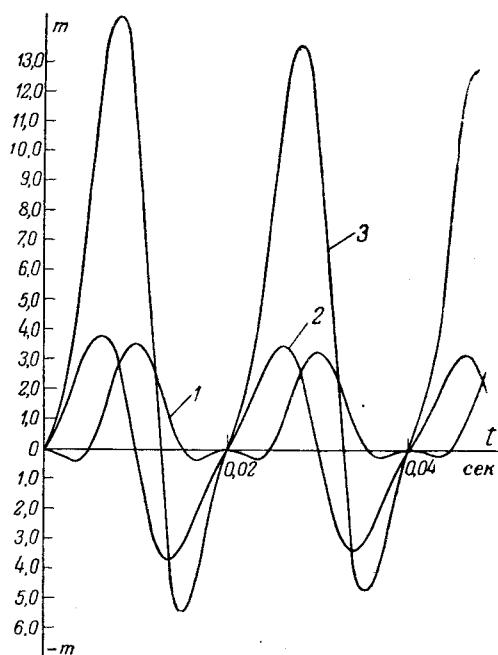


Рис. 3. Моменты вращения гидрогенератора без продольно-поперечной успокоительной обмотки на роторе при различных режимах.

1 — при самосинхронизации и $s = 0$, $\delta_0 = 135^\circ$; 2 — при внезапном трехфазном коротком замыкании; 3 — при включении в сеть в возбужденном состоянии при $s = 0$ и $\delta_0 = 135^\circ$.

номинальному) и становится практически в 2 раза меньшим, чем момент вращения при внезапном трехфазном коротком замыкании на выводах машин, с возможностью которого приходится считаться и при работе генератора в блоке с трансформатором.

На рис. 5 приведены кривые изменения кратности момента вращения при самосинхронизации по отношению к моменту вращения при внезапном трехфазном коротком замыкании на зажимах машин без успокоительных обмоток в зависимости от отношения внешнего сопро-

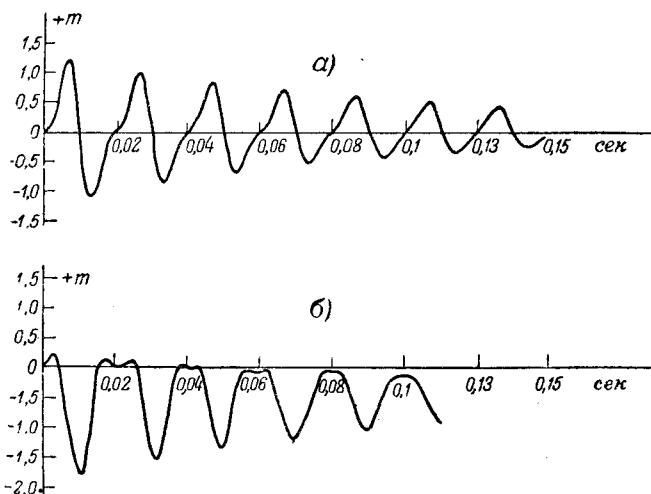


Рис. 4. Моменты вращения, возникающие при включении в сеть способом самосинхронизации через трансформатор гидрогенератора без успокоительных контуров на роторе.

а — при $s = 0,0015$ и $\delta_0 = 0$; б — при $s = 0,0015$ и $\delta_0 = 45^\circ$.

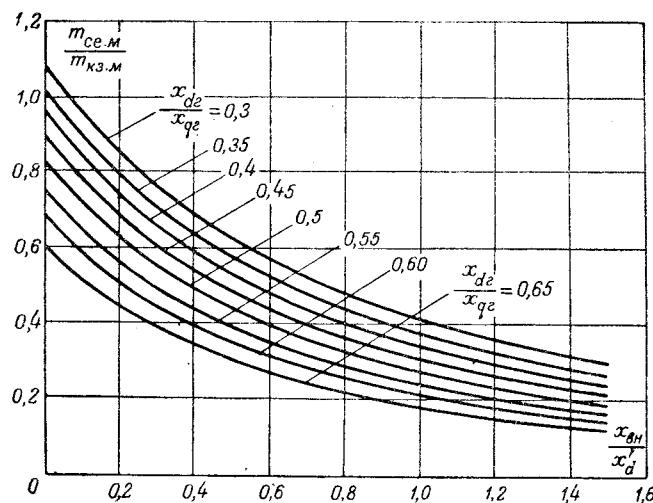


Рис. 5. Зависимость от внешнего реактивного сопротивления кратности момента вращения при самосинхронизации по отношению к моменту вращения при трехфазном коротком замыкании на выводах (напряжение до короткого замыкания 1,05 номинального) для машин без успокоительных контуров на роторе.

тивления $x_{\text{вн}}$ к переходному реактивному сопротивлению генератора x'_{d2} . Кривые построены для генераторов, имеющих различные значения отношения переходного реактивного сопротивления к синхронному реактивному сопротивлению по поперечной оси. При построении принималось, что до короткого замыкания напряжение генератора в режиме холостого хода было 1,05 номинального. Это соответствует требованиям ГОСТ 183-41 на механическую прочность синхронных машин при внезапном коротком замыкании.

Из кривых видно, что при $x'_{d2}/x_{q2} > 0,35$ момент вращения при самосинхронизации всегда меньше момента вращения, возникающего при трехфазном коротком замыкании на зажимах в условиях, соответствующих ГОСТ 183-41. Для генераторов средней и большой мощности, как правило, отношение $x'_{d2}/x_{q2} \geq 0,4$. Кроме того, такие генераторы обычно включаются способом самосинхронизации через некоторое внешнее сопротивление (трансформатор, линия и т. п.), поэтому возникающий в них вращающий момент значительно меньше, чем при коротком замыкании.

Только при включении способом самосинхронизации машин малой мощности (несколько тысяч киловольтампер и ниже) возможны условия, при которых $x_{\text{вн}} \approx 0$ и момент вращения в наихудшем случае (включение при углах 45° , 135° и т. д.) будет практически равен моменту вращения при внезапном трехфазном коротком замыкании. Такие моменты вращения при обычных параметрах машин без успокоительных обмоток не представляют опасности даже для крупных машин.

Отметим, что при выпадении явнополюсных машин из синхронизма они подвергаются воздей-

ствию моментов вращения того же порядка, что при коротком замыкании, причем более длительному.

При несимметричных коротких замыканиях в таких машинах возникают большие моменты вращения, чем при трехфазных коротких замыканиях [Л. 5]. Так, при двухфазном коротком замыкании на зажимах рассмотренного выше гидрогенератора в нем возникает вращающий момент с амплитудой порядка 6,5 по отношению к номинальному, что почти вдвое превышает момент вращения при трехфазном коротком замыкании. Опыт эксплуатации показывает, что генераторы выдерживают работу в таких режимах без повреждений.

Следует также указать, что при самосинхронизации в наихудшем случае момент пульсирует от нуля до максимального значения, но не знакопеременный, как при коротком замыкании.

Известно [Л. 6, 7], что при пульсирующей нагрузке в металлических конструкциях допускаются более высокие напряжения, чем при знакопеременной нагрузке. Поэтому при одинаковых максимальных значениях момента вращения режим самосинхронизации следует считать более легким для машины, чем режим внезапного трехфазного короткого замыкания.

Заключение. Из изложенного следует, что возникающие при самосинхронизации моменты вращения, даже у машин без успокоительных контуров на роторе, не представляют опасности для машины.

Наличие успокоительных обмоток на роторе снижает значения момента вращения, возникающего в первые периоды после включения машины в сеть способом самосинхронизации.

В заключение отметим, что возникающий при самосинхронизации момент вращения воспринимается креплениями активной стали и станины статора к фундаменту. На вал между генератором и первичным двигателем действует лишь часть этого момента, равная в первом приближении отношению махового момента первичного двигателя к маховому моменту всего агрегата. У гидроагрегатов это отношение составляет величину всего порядка 0,1, т. е. механические воздействия на гидротурбину даже при самосинхронизации машин без успокоительных контуров на роторе будут ничтожными.

Обозначения

- U — напряжение сети, приложенное к цепи статора;
 δ — угол между напряжением сети и э. д. с.;
 x_d, x_q — синхронные индуктивные сопротивления цепи статора по продольной и поперечной осям;
 x_d' — переходное индуктивное сопротивление по продольной оси;
 x_d'', x_q'' — сверхпереходные индуктивные сопротивления по продольной и поперечной осям;
 T_{do}, T_d' — постоянные времени переходного процесса по продольной оси при разомкнутой и при замкнутой цепи статора;
 T_{do}'', T_d'' — постоянные времени сверхпереходного процесса по продольной оси при разомкнутой и замкнутой цепи статора;
 T_{qo}', T_q' — постоянные времени поперечного успокоительного контура при разомкнутой и замкнутой цепи статора;
 T_a — постоянная времени апериодического тока статора;
 s — скольжение;
 m — момент вращения;
 t — время.

Все величины даны в относительных единицах; за базисные величины приняты паспортные данные генератора; время (включая и постоянные времени) выражено в радианах.

Литература

1. Р. А. Лютер. Теория переходных режимов синхронной машины. Ленинград, 1933.
2. В. А. Веников и Л. А. Жуков. Переходные процессы в электрических системах. Госэнергоиздат, 1953.
3. Л. Г. Мамиконянц и И. А. Сыромятников. Включение синхронных генераторов на параллельную работу по методу самосинхронизации. Электрические станции, № 9, 1949.
4. А. Г. Крит и Л. Г. Мамиконянц. Включение синхронных генераторов на параллельную работу по методу самосинхронизации. Сборник „Автоматизация и телемеханизация гидроэлектростанций“. Госэнергоиздат, 1950.
5. Р. А. Лютер. Расчет моментов вращения синхронных машин при коротких замыканиях. Сборник „Электросила“, № 7, 1950.
6. А. Е. Алексеев. Конструкция электрических машин. Госэнергоиздат, 1949.
7. Б. Н. Красовский. Вопросы прочности электрических машин. Изд. АН СССР, 1951.

[21.4.1954]



Схемы и устройства для включения на параллельную работу синхронных генераторов способом самосинхронизации

Кандидат техн. наук Ю. М. ЭЛЬКИНД

ЦНИЭЛ МЭС СССР

Оптимальный режим самосинхронизации синхронных генераторов обеспечивается при выполнении следующих условий:

1. Напряжение на зажимах обмотки статора должно быть снижено до остаточного и не превышать 0,1 ... 0,2 номинального напряжения.

2. Разность частот генератора и сети не должна превосходить $\pm(3 \dots 5)\%$ номинальной частоты.

3. На генератор должно быть подано возбуждение непосредственно после включения его в сеть.

4. Устройства автоматического регулирования и форсировки возбуждения следует подключать до или одновременно с включением генератора в сеть.

Если включение генератора в сеть происходит в процессе пуска первичного двигателя, то для обеспечения надежного и быстрого втягивания генератора в синхронизм избыточный момент, создаваемый первичным двигателем после включения генератора в сеть, должен быть меньше среднего асинхронного момента генератора.

Выполнение этих условий, в частности контроль частоты невозбужденного генератора, требует простейшей щитовой измерительной аппаратуры, которой обычно снабжается агрегат (тахометр первичного двигателя, частотомер шин и т. п.).

Однако включение синхронного генератора в сеть способом самосинхронизации осуществимо даже в тех случаях, когда на агрегате нет приборов измерения частоты.

Включение в сеть невозбужденного синхронного генератора возможно при любом практическом имеющем место скольжении.

Скольжение, при котором генератор втягивается в синхронизм, зависит от среднего асинхронного момента генератора: Как правило, явнополюсные машины даже без успокоительных обмоток надежно втягиваются в синхронизм при включении со скольжением до $\pm 10\%$, а неявнополюсные втягиваются в синхронизм при еще больших скольжениях.

Известно несколько электростанций с генераторами малой мощности, где включение генераторов в сеть осуществляется по способу самосинхронизации и без контроля разности частот генератора и сети. Например, по инициативе

В свете опыта эксплуатации дан критический обзор и рассмотрены возможности использования схем самосинхронизации.

т. Рыклина на электростанции с двумя явнополюсными генераторами без успокоительных обмоток на напряжение 220 в, мощностью 50 и 85 ква уже сравнительно давно внедрено включение способом самосинхронизации генераторов на параллельную работу, самостоятельную или совместную с сетью.

Якорь возбудителя каждого генератора на глухо присоединен к обмотке ротора. Автомата гашения поля нет. Регулирование возбуждения осуществляется вручную — реостатом возбуждения возбудителя. Генераторы непосредственно соединены с двигателями внутреннего сгорания типа С-56, мощностью 65 л. с., номинальной скоростью вращения 750 об/мин. Двигатели снабжены регулятором скорости центробежного типа прямого действия.

Пуск двигателя осуществляется при определенном и заранее отмеченном положении рукоятки регулятора скорости, соответствующем номинальной скорости вращения агрегата на холостом ходу.

При включении генератора в сеть сопротивление реостата возбуждения полностью вводилось и остаточное напряжение генератора составляло 40 ... 60 в (20 ... 30% номинального).

Учитывая возможные изменения установившейся скорости вращения двигателя и частоты, было предварительно проведено свыше 20 включений при скольжениях порядка $\pm(15 \dots 18)\%$. Во всех случаях генератор быстро втягивался в синхронизм без каких-либо видимых ненормальных явлений. Процесс самосинхронизации заканчивался за 3 ... 6 сек.

На одной электростанции с двумя генераторами по 56 ква каждый, связанными ременной передачей с локомобилями, машинист успешно включает генератор на параллельную работу с другим способом самосинхронизации, определяя номинальную скорость вращения агрегата по слуху, по частоте ударов сшивки ремня (!) Генератор всегда быстро втягивается в синхронизм, токи статора в момент включения не превышают 1,6, а напряжение на шинах быстро восстанавливается до номинального.

Однако опыт показывает, что включение генераторов в сеть при большом скольжении удлиняет время втягивания генератора в синхронизм и время восстановления напряжения в сети. В не-

которых случаях, например при явнополюсных генераторах средней и большой мощности и при отсутствии успокоительной обмотки, генератор может не втянуться в синхронизм уже при скольжениях порядка $(8 \dots 10)\%$.

Иногда для определения частоты предварительно поднимают возбуждение генератора до достижения номинального напряжения на холостом ходу, затем по установлению необходимой скорости вращения агрегата снимают возбуждение и включают машину в сеть. Следует отметить, что такой способ контроля разности частот не может быть рекомендован.

Прежде всего избежание ошибочного включения в сеть возбужденного генератора при самосинхронизации весьма нежелательно предварительное возбуждение генератора. Далее, существует опасность, что в процессе снятия возбуждения может значительно измениться разность частот генератора и сети как вследствие изменения частоты сети, так и скорости вращения подключаемого агрегата.

ЦНИЭЛ Министерства электростанций разработала¹ типовые схемы и устройства для включения на параллельную работу синхронных машин способом самосинхронизации, обеспечивающие эксплуатационно удобный и надежный контроль условий оптимального режима самосинхронизации.

В основу типовых схем был положен принцип контроля разности частот генератора и сети с использованием остаточного напряжения генератора.

Использование остаточного напряжения предопределило характер измерительного устройства для контроля разности частот: были разработаны и внедрены в производство реле разности частот типа ИРЧ-01 [Л. 3] и электронный стабилизатор остаточного напряжения типа СН-5 [Л. 4].

Однако были также разработаны типовые схемы контроля разности частот без специальной аппаратуры, а с применением таких простейших приборов, как щитовой вольтметр и вибрационный частотомер или даже электрическая лампочка накаливания [Л. 2]. Упрощенные схемы нашли широкое применение на электростанциях малой мощности.

Типовые схемы предусматривают блокировки, исключающие включение машины в сеть, если не отключен автомат гашения поля, и предотвращающие попадание измерительной аппаратуры, контролирующей частоту невозбужденной машины, под напряжением сети после включения машины в сеть, а также обеспечивающие включение автоматического гашения поля (АГП) после включения выключателя генератора.

В схемах автоматической и полуавтоматической самосинхронизации, кроме того, предусматривается кратковременная подача команды на

включение выключателя и АГП подключаемого генератора. Для этой цели введено промежуточное реле с выдержкой времени на отпадение (импульсное реле *РИ*), которая создается за счет времени нарастания магнитного потока при включении реле под напряжение.

Использование остаточного напряжения синхронной машины для контроля ее частоты оправдало себя полностью. Опыт показывает, что остаточное напряжение машины в условиях ее эксплуатации в самых различных режимах обычно колеблется в пределах $\pm 50\%$ его среднего значения. Среднее значение остаточного напряжения синхронных машин в подавляющем большинстве случаев значительно больше ($0,2 \dots 0,3\%$) номинального напряжения обмотки статора. Эти данные, полученные более чем за пятилетний период эксплуатации значительного числа машин, гарантируют надежную работу типовых схем самосинхронизации.

Типовые схемы подразделяются на ручные, полуавтоматические и автоматические.

В ручных схемах (рис. 1, 2 и 3) подгонка частоты генератора к частоте сети и включение генератора в сеть осуществляются вручную. В полуавтоматических схемах подгонка частоты генератора также производится вручную, но включение его в сеть — автоматически, с помощью реле разности частот типа ИРЧ-01. Автоматические схемы включают генератор в сеть посредством реле разности частот ИРЧ-01 в процессе пуска агрегата.

Как положительную особенность схем и устройств автоматической самосинхронизации следует отметить отсутствие в них сложных и не вполне надежных устройств для автоматического уравнивания напряжения и частоты, необходимых в схемах точной синхронизации.

Схемы ручной синхронизации рекомендуется применять для всех неавтоматизированных агрегатов. Схема на рис. 1 особенно целесообразна для станций малой мощности. На станциях средней и большой мощности следует внедрять схему рис. 3.

Контроль частоты невозбужденного генератора с помощью частотомера, включенного через стабилизатор остаточного напряжения (рис. 3), позволяет быстро и достаточно точно подогнать

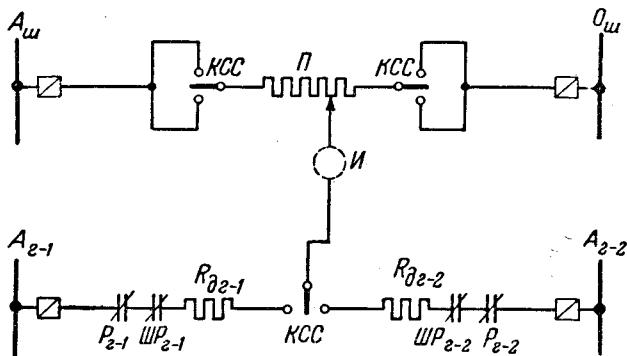


Рис. 1. Схема ручной самосинхронизации генераторов с лампой накаливания, вольтметром или вибрационным частотомером.

И=измеритель; П=потенциометр.

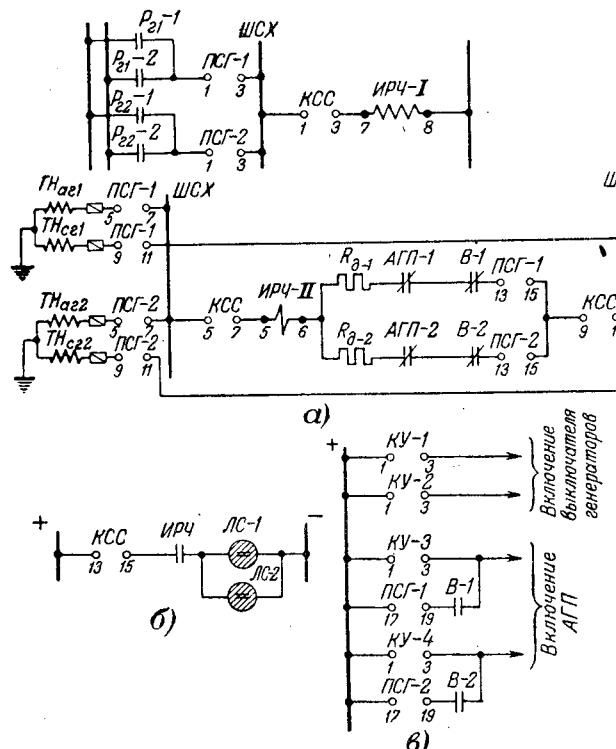


Рис. 2. Принципиальная схема ручной самосинхронизации генераторов с реле ИРЧ-01, действующим на сигнал.

а— цепи переменного тока; б— цепи управления выключателем и АГП.

частоту генератора к частоте сети, а время прогрева (после отключения автомата гашения поля) ламп стабилизатора остаточного напряжения 20 ... 25 сек обеспечивает спад напряжения генератора до остаточного напряжения.

Гидротурбины, ветродвигатели, локомобили, двигатели внутреннего сгорания и некоторые другие первичные двигатели спустя 20 ... 40 сек после пуска уже достигают номинальной скорости вращения. Для агрегатов с первичными двигателями этого типа рекомендуется применять автоматические схемы. Одна из таких схем [Л. 1] применительно к гидроагрегату приведена на рис. 4.

В этой схеме на протяжении всего процесса пуска реле ИРЧ-01 контролирует разность частот сети и генератора и включает генератор в сеть вблизи синхронной скорости вращения агрегата.

Обычно соответствующим выбором уставки пускового устройства первичного двигателя удается обеспечить сравнительно плавный пуск агрегата с нарастанием скорости в режиме, близком к апериодическому, и с установлением скорости вращения на холостом ходу, равной или на (0,5 ... 1) % большей номинальной скорости вращения. При этом так называемом *пуске по средней характеристике* избыточный момент, развиваемый первичным двигателем вблизи синхронной скорости, ограничен, и если средний асинхронный момент генератора достаточно велик, то после включения в сеть генератор надежно и быстро втягивается в синхронизм.

В некоторых случаях, например при гидрогенераторе без успокоительной обмотки и, особен-

но, при включении генератора через длинную линию или в аварийных условиях, когда напряжение на зажимах машины значительно понижено, или частота системы меньше номинальной, максимальное значение среднего асинхронного момента машины может оказаться соизмеримым с избыточным моментом первичного двигателя или даже меньше его. Расчеты и опыт показывают, что в этих случаях пуск агрегата по средней характеристике может привести к значительным колебаниям скорости вращения и увеличению времени втягивания машины в синхронизм или даже к невхождению в синхронизм [Л. 5] и появлению незатухающих колебаний скорости вращения. В таких случаях рекомендуется осуществлять пуск по сниженной характеристике [Л. 2, 6, 8], когда механизм изменения скорости регулятора первичного двигателя устанавливается в крайнее нижнее положение, соответствующее, например, 0,8 ... 0,85 номинальной скорости вращения.

При пуске по сниженной характеристике после достижения пониженной скорости вращения воздействие на механизм изменения скорости обеспечивает медленное повышение скорости вращения машины до момента срабатывания реле разности частот. При этом повышение скорости выбирается такое ускорение, которое ограничи-

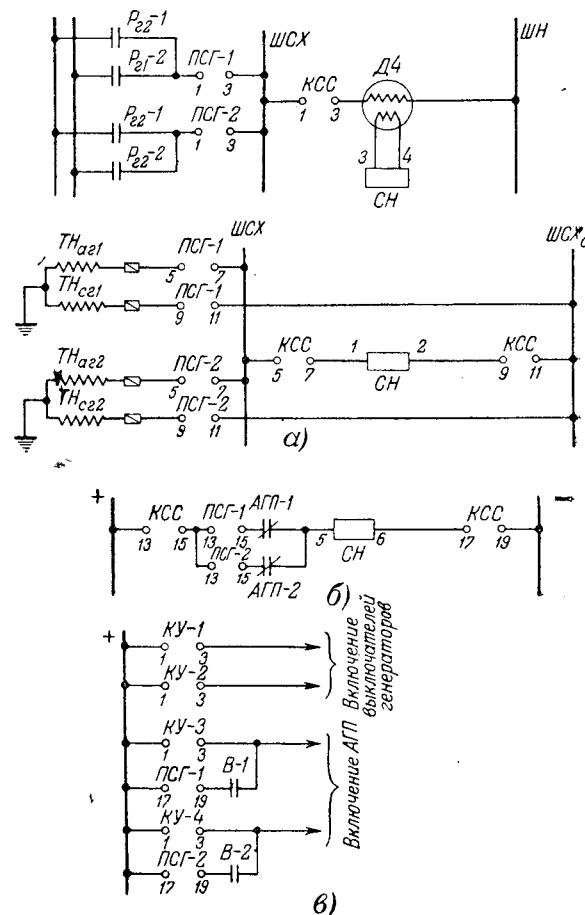


Рис. 3. Принципиальная схема ручной самосинхронизации генераторов с двойным частотомером и стабилизатором остаточного напряжения типа СН.

1,2—вход СН; 3,4—выход; 5,6—накальные и анодные цепи СН.

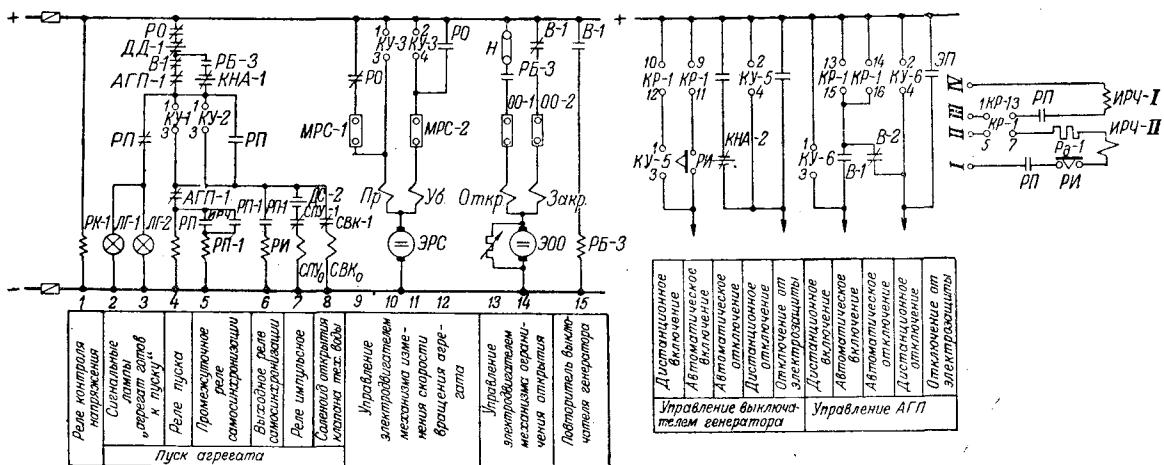


Рис. 4. Принципиальная схема автоматической самосинхронизации генераторов с реле разности частот ИРЧ-01 при пуске агрегата по средней разгонной характеристике (I, II — к трансформатору напряжения генератора; III, IV — к трансформатору напряжения шин станции).

вает избыточный момент первичного двигателя до необходимого значения.

Схемы автоматической самосинхронизации по сниженной характеристике нашли применение для ветроагрегатов, для которых характерны большие избыточные моменты при сильном ветре [Л. 7].

Длительный опыт эксплуатации схем автоматической самосинхронизации показал их надежную и безотказную работу. Схема полуавтоматической самосинхронизации (рис. 5) получила большое применение для турбогенераторов средней и большой мощности. Схема описана в литературе [Л. 1, 2, 4]. Несмотря на недостатки схема в силу ее простоты рекомендована к внедрению.

При эксплуатации дежурный персонал должен строго соблюдать последовательность действий: сначала должен быть отключен АГП, и только после того как процесс гашения поля будет закончен, включаются ключ *ПСГ* подключающего генератора и ключ *КСС* устройств самосинхронизации (рис. 5). При нарушении установленного порядка действий возможно включение ге-

нератора в сеть при неполноты погашенном поле генератора, а также перегорание добавочного сопротивления к реле ИРЧ-01 и предохранителей трансформатора напряжения подключаемого генератора.

При включении ключей *КСС* и *ПСГ* тогда, когда разность частот генератора и сети такова, что реле ИРЧ-01 может сработать сразу, возможен отказ включения выключателя генератора из-за недостаточной выдержки реле *РИ*, так как магнитный поток реле может не успеть достичь своего номинального значения.

Опыт эксплуатации также показал, что отсутствие в схеме рис. 5 контроля частоты невозбужденного генератора задерживает процесс самосинхронизации.

Для предотвращения отказа включения выключателя и в целях ускорения процесса самосинхронизации целесообразно принять следующий порядок действия дежурного персонала.

Скорость вращения агрегата устанавливается на 5 ... 10% ниже номинальной. После проверки

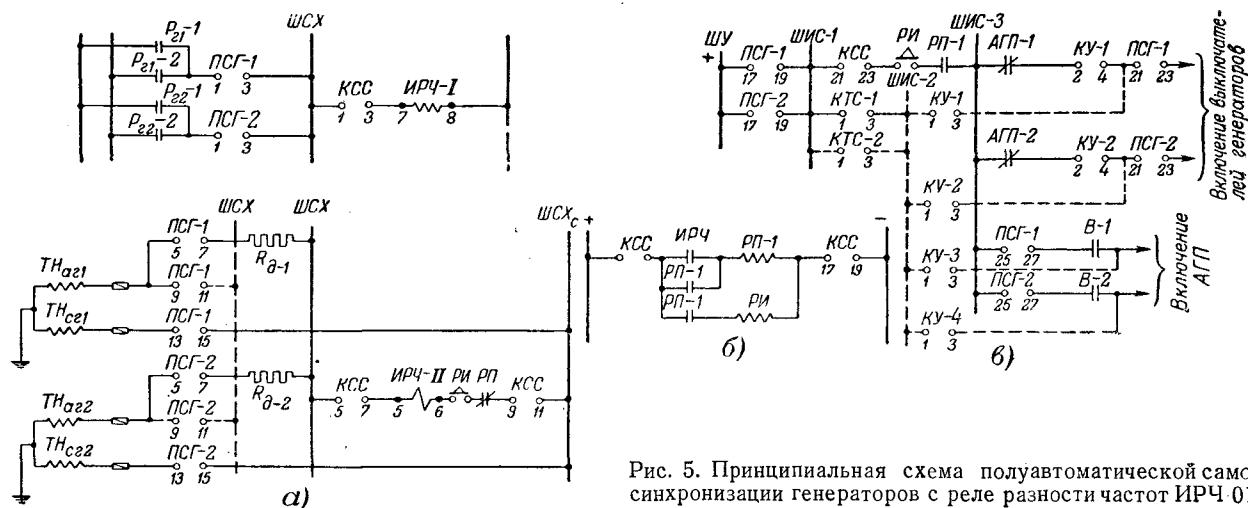


Рис. 5. Принципиальная схема полуавтоматической самосинхронизации генераторов с реле разности частот ИРЧ-01.

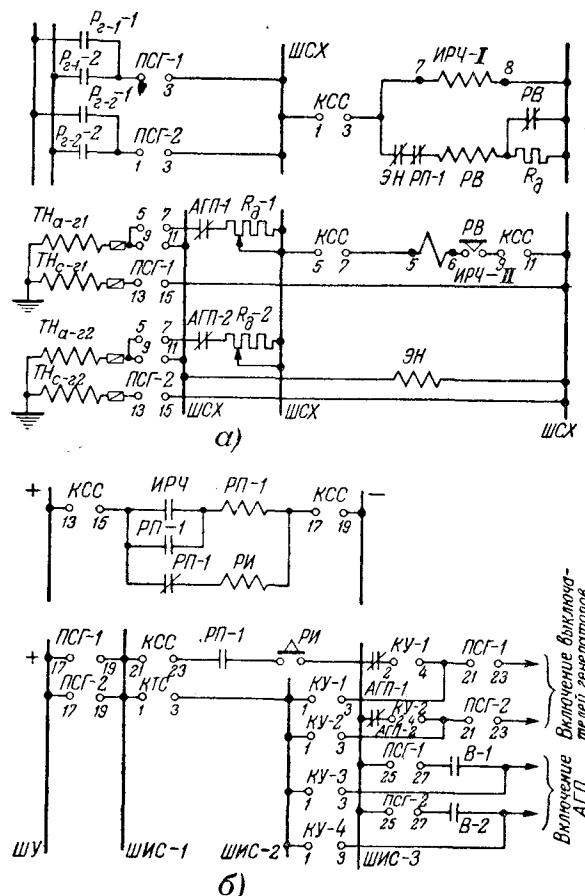


Рис. 6. Принципиальная схема полуавтоматической самосинхронизации генераторов с реле ИРЧ-01 и с блокировкой напряжения.

а — цепи переменного тока; б — цепи постоянного тока (контакты 2—4 ключей КУ-1 и КУ-2 замкнуты, а контакты 1—3 разомкнуты, когда ключи находятся в положении отключено).

Диаграммы ключей и контактов к схемам автоматической самосинхронизации

КУ-1, КУ-2 ключи управления агрегатом (Тип КВ-2/п.Ш)

Схема пакетов в положении „отключено“	Откл	1 о	о 2
Тип рукоятки и пакетов	п.Ш	2	
Контакт	—	1-3	2-4
Пустить	■	×	—
Отключено	■	—	—
Остановить	■	—	×

КУ-3 ключ управления двигателем механизма регулирования скорости

Схема пакетов (сзади) в положении „отключено“	Откл.	1 о	о 2
Тип рукоятки и пакетов	п.Ш	2	
Контакт	—	1-3	2-4
Прибавить	■	×	—
Отключено	■	—	—
Убавить	■	—	×

Таблица 1
Схема и диаграмма ключа КСС (тип КФ) и переключателей ПСГ (тип КФ₃) на два положения

Схема пакетов в положении „отключено“	Вкл	1																											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
Тип рукоятки и пакетов	п.Ш	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Контакт		1-3	2-4	5-7	6-8	9-11	10-12	13-15	14-16	17-19	18-20	21-23	22-24	25-27	28-28														
Положение		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Отключено		■	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Включен		■	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

отсутствия напряжения на статоре подключаемого генератора включают ключи ПСГ и КСС и плавно повышают скорость вращения первичного двигателя до срабатывания реле ИРЧ-01 и включения выключателя. Затем набирают активную и реактивную нагрузки, как обычно.

В силу указанных недостатков в ряде случаев типовая схема рис. 5 подвергалась изменениям на местах: в нее вводились дополнительные блокировки, предотвращающие неправильную работу схемы при ошибках дежурного персонала, а также контроль частоты невозбужденного генератора с помощью вибрационного частотометра, включенного на остаточное напряжение подключаемого генератора через электронный стабилизатор напряжения типа СН-5.

Изучив опыт эксплуатации, ЦНИИЭЛ переработал схему. В новых схемах полуавтоматической

Таблица 2

КР-1 ключ режима самосинхронизации (Тип КФ-11.1/п.Ш)

Схема пакетов в положении „отключено“	Откл	1 о	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Тип пакетов	—	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Контакт	—	1-3	2-4	5-7	6-8	9-10	10-12	13-15	14-16								
Положение		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Автоматическая самосинхронизация		■	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Отключено		■	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Ручная самосинхронизация		■	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

Диаграмма контактов механизма реулятора скорости и направляющего аппарата турбины

Наименование	МРС				00		КНА		
	Контакт	МРС-1	МРС-2	МРС-3	МРС-4	00-1	00-2	КНА-1	КНА-2
Полное откл. (верхнее положение)		■	■	■	■				
Холостой ход (среднее положение)		■	■	■	■				
Ладное закрытие (нижнее положение)		■	■	■	■				
В цепи	ЭРС	ЭРС	ЭРС	ЭРС	ЭРС	000	000	РП	Откл. Выкл.
В какой схеме									

Таблица 3

Диаграмма переключателя ПГС и ключа КСС на три положения

Схема и диаграмма переключателя ПГС типа КФ₃

Схема пакетов (зади) в положении „отключено“		Откл. 1	2	5	6	9	10	13	14	17	18	21	22
п.с	тс	1	2	5	6	9	10	13	14	17	18	21	22
4	3	8	7	12	11	15	16	20	19	24	23	24	23
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Тип рукоятки и пакетов

п.ВII

Контакт

Положение

Полувавтоматическая

Полувавтоматическая	Х	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Отключено	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Точная синхронизация	Х	—	Х	—	Х	—	Х	—	Х	—	Х	—	Х

Полувавтоматическая

самосинхронизация

Отключено

Точная синхронизация

самосинхронизации введена блокировка, запрещающая подключение реле разности частот, пока не будет отключен АГП и напряжение на зажимах статора генератора не снизится до допустимого значения. Схемы были разработаны с применением косвенной блокировки с помощью реле времени и с применением прямой блокировки с помощью реле напряжения. Одна из новых схем изображена на рис. 6.

Если напряжение генератора превышает $0,15 \cdot U_n$, то реле напряжения ЭН срабатывает и своими контактами разрывает цепь обмотки реле времени РВ (рис. 6). В противном случае контакты реле ЭН в цепи обмотки РВ остаются замкнутыми, реле времени срабатывает и своими контактами замыкает цепь токовой обмотки реле ИРЧ. Реле РВ обеспечивает правильную работу реле напряжения ЭН и «зарядку» реле РИ.

В случае применения схемы полуавтоматической самосинхронизации рекомендуется предусматривать контроль частоты невозбужденного генератора при помощи стабилизатора остаточного напряжения типа СН-5 (рис. 3).

В табл. 1—3 приведены диаграммы ключей схем самосинхронизации.

Выводы. 1. Опыт эксплуатации показал надежную и вполне удовлетворительную работу типовых схем для ручной и автоматической самосинхронизации синхронных генераторов.

2. Опыт эксплуатации также выявил необходимость в дополнении типовой схемы полуавтоматической самосинхронизации блокировкой, исключающей неправильную работу схемы при ошибках дежурного персонала, а также показал целесообразность введения для турбогенераторов средней и большой мощности контроля разности

Схема и диаграмма ключа КСС типа КФ

Схема пакетов (зади) в положении „отключено“		Откл. 1	2	5	6	9	10	13	14	17	18	21	22
п.с	тс	1	2	5	6	9	10	13	14	17	18	21	22
4	3	8	7	12	11	15	16	20	19	24	23	24	23
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

частот невозбужденного генератора и сети с помощью частотомера, включенного через стабилизатор остаточного напряжения.

Обозначения

P_2 — блок-контакты разъединителя генератора;
 P_{12} — блок-контакты шунтового реостата генератора;
 R_d — добавочное сопротивление в цепи измерителя;
 V — блок-контакты выключателя;
 TH — вторичная обмотка трансформатора напряжения;
 PL — промежуточное реле схемы самосинхронизации;
 EN — реле повышения напряжения с уставкой 15 в;
 PB — реле времени с уставкой 2—3 сек;
 EP — электродвигатель регулирования скорости;
 EO — электродвигатель ограничителя открытия.

Литература

1. ЦНИЭЛ МЭС. Включение на параллельную работу синхронных генераторов и компенсаторов способом самосинхронизации. Госэнергоиздат, 1952.
2. ЦНИЭЛ МЭС ВИЭСХ МСХ. Самосинхронизация синхронных генераторов мощностью до 3 000 квт. Госэнергоиздат, 1953.
3. М. Г. Портной и Ю. М. Элькинд. Реле разности частот индукционного типа для самосинхронизации генераторов. Электричество, № 9, 1951.
4. А. М. Малахова и Ю. М. Элькинд. Схемы и устройства для самосинхронизации генераторов. Электрические станции, № 8, 1951.
5. Э. Г. Файнштейн. Самосинхронизация генераторов средней мощности. Электрические станции, № 9, 1949.
6. Ю. М. Элькинд. Автоматическая самосинхронизация генераторов по сниженной разгонной характеристике. Электрические станции, № 3, 1952.
7. Д. Н. Быстрицкий. Вопросы синхронизации генераторов сельских ветроэлектрических станций, работающих в энергосистеме. ВИЭСХ, 1952.
8. И. С. Курдяни, В. И. Саанов и И. А. Черняк. Автоматическая самосинхронизация гидроагрегатов с крутыми разгонными характеристиками. Электрические станции, № 7, 1954.

[14.4.1954]



Метод расчета катушки со сталью на переменном токе

Кандидат техн. наук, доц. Б. К. БУЛЬ

Московский энергетический институт им. Молотова

Основным элементом большинства электрических приборов и аппаратов является катушка со стальным магнитопроводом. Расчет ее на постоянном токе прост и достаточно полно изложен в литературе

[Л. 2...6]. Расчет же катушки на переменном токе в литературе освещен слабо [Л. 8, 10, 12, 13], так как расчет магнитной цепи еще недостаточно разработан. В данной работе автор пытается разрешить некоторые вопросы расчета.

Излагаемый метод применим для магнитных цепей без воздушного зазора и с зазором, когда рассеяние можно не учитывать. Такие цепи широко используются для датчиков, дросселей, реле и других электромагнитных механизмов.

Излагается способ расчета на заданную индукцию в катушке напряжения и тока с магнитопроводом без воздушного зазора или с зазором. Приводятся полученные автором расчетные формулы для определения индуктивности и активного сопротивления катушки с учетом магнитного сопротивления и потерь в стали. Расчетным путем находятся длина или сечение магнитопровода. Рассмотрены варианты расчета на различные заданные параметры. Приведен числовой пример.

Нитные величины даны в практической системе единиц.

Для тока, напряжения, э. д. с., магнитного сопротивления и проводимости приняты действующие значения, а для потока и индукции —

максимальные. Все размеры даны в сантиметрах.

Расчет катушки напряжения. Для вывода расчетных формул воспользуемся комплексным методом.

Поток Φ магнитопровода отложим по действительной оси комплексной плоскости (рис. 1, а).

Намагничающая сила катушки F , если учитывать потери в стали, опережает поток Φ на угол θ . Разложим эти величины на две взаимно перпендикулярные составляющие.

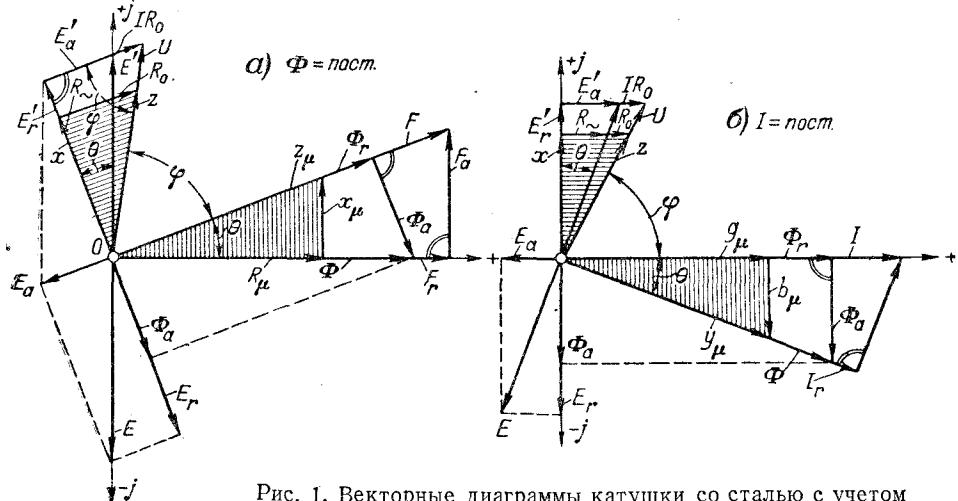


Рис. 1. Векторные диаграммы катушки со сталью с учетом потерь в стали, но без учета потока рассеяния.

Расчет ведется при нелинейной магнитной характеристике, с учетом потерь в стали и с учетом активного электрического сопротивления катушки¹. Предлагаемый метод дает возможность рассчитать магнитную цепь и катушку при номинальной и повышенной частоте.

Принято синусоидальное изменение напряжения, тока и потока. Если же цепь работает при высоких индукциях, за коленом кривой намагничивания, то расчет следует вести по первой гармонике [Л. 1]. Все электрические и маг-

нитное сопротивление цепи в комплексной форме

$$Z_p = \frac{\dot{F}}{\Phi} = \frac{F_r}{\Phi} + j \frac{F_a}{\Phi} = R_p + j x_p = (\rho_R + j \rho_x) \frac{l}{S}, \quad (1)$$

где $F = Iw$, $F_a = I_r w$ — соответственно, действующее значение н. с. и ее активная и реактивная составляющие; l — средняя длина магнитопровода; S — активное поперечное сечение магнитопровода; w — число витков катушки;

¹ Расчет цепей, работающих на линейной части магнитной характеристики, автор изложил в [Л. 9].

ρ_R и ρ_x — активное и реактивное удельные магнитные сопротивления стали [Л 7, 11].

Значения их определяются из кривых рис. 2.

Тангенс угла потерь в стали на вихревые токи и гистерезис

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{x_\mu}{R_\mu}. \quad (2)$$

Через составляющие потока Φ определяем э. д. с.

$$E'_a = \frac{\omega w}{V^2} \Phi_a,$$

$$E'_r = \frac{\omega w}{V^2} \Phi_r. \quad (3)$$

Складывая эти э. д. с. с активным падением напряжения катушки IR_0 , получаем полное напряжение на зажимах U . Полная мощность катушки в комплексном виде:

$$P = U \dot{I}. \quad (4)$$

Значения тока и напряжения получаем из векторной диаграммы (рис. 1, a):

$$\begin{aligned} \dot{I} &= I_r - jI_a, \quad U = jE' + \\ &+ IR_0 \cos \theta + jIR_0 \sin \theta, \end{aligned}$$

где э. д. с., создаваемая потоком Φ ,

$$E' = \frac{\omega w}{V^2} \Phi = \frac{\omega w^2}{V^2 R_\mu} I \cos \theta = x_0 I \cos \theta, \quad (5)$$

где x_0 — индуктивность катушки, когда потери в стали равны нулю.

Подставляя полученные соотношения в (4), получим

$$P = I^2 z. \quad (6)$$

Полное электрическое сопротивление катушки с учетом потерь в стали

$$Z = R_0 + x_0 \sin \theta \cos \theta + jx_0 \cos^2 \theta = R + jx, \quad (7)$$

где

$$R = R_0 + R_\sim$$

— полное активное сопротивление катушки;

$$R_0 = \rho l_{cp} i_q \frac{w}{I} = C_1 \frac{w}{I} \quad (8)$$

— активное сопротивление, определяемое материалом и конструктивными параметрами самой катушки,

где ρ — удельное электрическое сопротивление провода;

l_{cp} — средняя длина витка катушки;

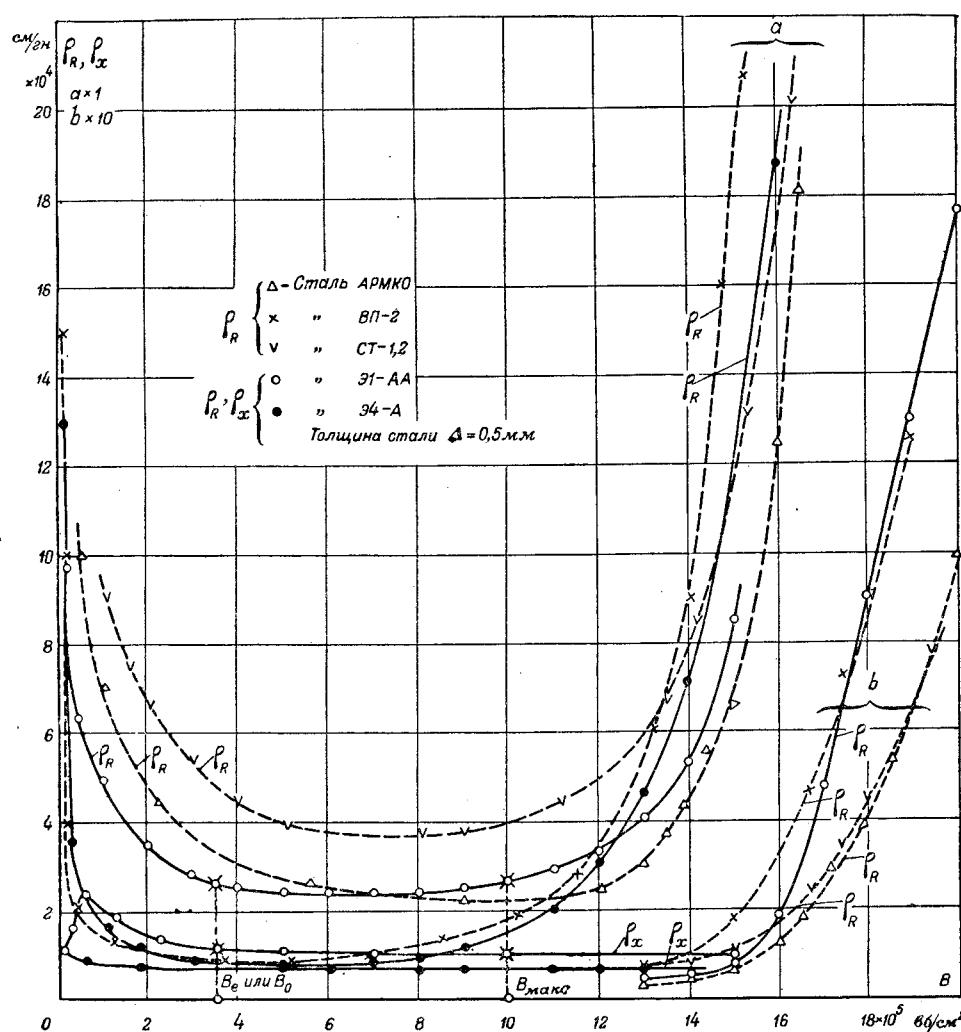


Рис. 2. Удельные активные и реактивные магнитные сопротивления стали в зависимости от индукции.

i_q — плотность тока;

R_\sim — активное сопротивление катушки, обусловленное потерями в стали на вихревые токи и гистерезис.

Реактивное сопротивление катушки с учетом потерь в стали

$$x = x_0 \cos^2 \theta = \omega L_0 \cos^2 \theta. \quad (9)$$

Связь между электрическими и магнитными сопротивлениями легко получить из векторной диаграммы:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{R_\sim}{x} = \frac{x_\mu}{R_\mu} \quad \text{или} \quad R_\sim = \frac{\omega^2 \omega}{V^2} \cdot \frac{x_\mu}{z_\mu^2},$$

$$x = \frac{\omega^2 \omega}{V^2} \cdot \frac{R_\mu}{z_\mu^2}. \quad (10)$$

Найдем соотношение между числом витков w , приложенным напряжением U и заданной индукцией B . Принято [Л. 2, 3, 6, 16] эту связь определять из уравнения, в котором э. д. с.

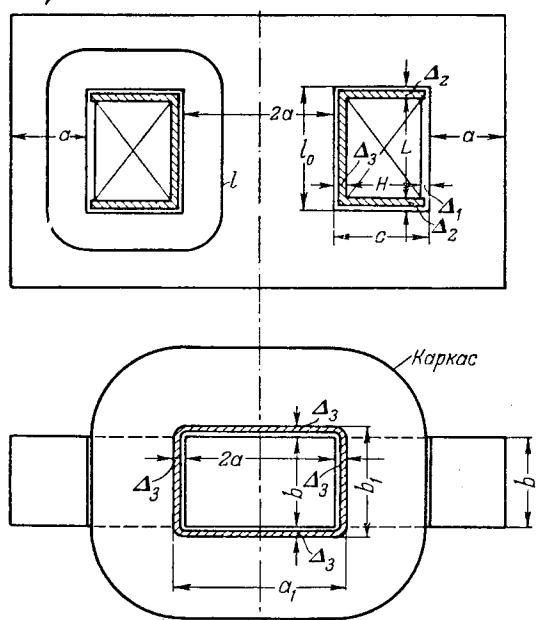


Рис. 3. Магнитная цепь дроссельной катушки ($a = 10$; $b = 12$; $H = 10$; $\Delta = 1$; $\Delta_2 = \Delta_3 = 1,5$).

приравнивается приложеному напряжению (активное сопротивление R_0 не учитывается),

$$U = E = \frac{\omega w}{V^2} \Phi. \quad (11)$$

Погрешность при этом получается тем больше, чем меньше магнитная индукция и больше потери в стали.

Пользуясь векторной диаграммой рис. 1,а, найдем число витков с учетом активного сопротивления катушки.

Подставляя в соотношение

$$U^2 = E_r^2 + (E_a' + IR_0)^2$$

значения величин из уравнений: $E_a' = E' \cos \theta$, $E_r' = E' \sin \theta$, $E' = \frac{\omega w}{V^2} \Phi$ и используя (9) и (10), получим число витков катушки:

$$w = \frac{U}{\sqrt{C_1^2 + C_2^2 + 2C_1C_2 \sin \theta}}. \quad (12)$$

Здесь $C_1 = \rho l_{cp} \cdot i_q$, $C_2 = \frac{\omega \Phi}{V^2}$, $l_{cp} = 2(a_1 + b_1) + \pi H$, $a_1 = 2(a + \Delta_3)$, $b_1 = b + 2\Delta_3$, H — высота катушки, a_1 и b_1 — размеры каркаса (рис. 3).

Намагничающая сила катушки

$$Iw = B_0 l, \quad (13)$$

$$\text{где } I = \frac{\pi d^2}{4} i_q.$$

Средняя длина магнитопровода (рис. 3)

$$l = 2(C + l_0) + \pi a = 2L + \varepsilon, \quad (14)$$

где

$$C = H + \Delta_1 + \Delta_3, \quad l_0 = L + 2\Delta_2,$$

$$\varepsilon = 2(\Delta_1 + 2\Delta_2 + \Delta_3 + H) + \pi a. \quad (15)$$

Величины Δ_2 и Δ_3 учитывают, кроме толщины стенок каркаса, еще и воздушные зазоры между ними и магнитопроводом. Площадь окна обмотки представим в таком виде:

$$HL = \frac{Iw}{i_q f_m}, \quad L = Iw \lambda, \quad \lambda = \frac{1}{i_q f_m H}. \quad (16)$$

Тогда

$$l = \varepsilon + \frac{\pi w d^2}{2 H f_m}, \quad (17)$$

где f_m — коэффициент заполнения окна медью [Л. 2].

Рассмотрим несколько вариантов расчета катушки с магнитной цепью без воздушного зазора (таблица, варианты а) и с зазором (варианты б). Варианты отличаются исходными и заданными величинами. Определение неизвестных величин рекомендуется проводить в том порядке, как это указано в таблице. Во всех вариантах значения, Δ_1 , Δ_2 , Δ_3 и a (рис. 3) следует выбирать.

Варианты расчета магнитной цепи и катушки со сталью на переменном токе

Варианты		Дано	Задаемся	Определяем
1	а б	U, B, S U, B, S, δ	i_q, H То же	$\theta, w, d, I, l, R_0, R_\infty, x, z, \varphi, P$ То же
2	а б	U, B, l U, B, l, δ	i_q, H То же	$\theta, f_m, d, I, w, b, S, R_0, R_\infty, x, z, \varphi, P$ То же
3	а б	I, B, S I, B, S, δ	i_q, H То же	$d, f_m, w, l, \theta, R_0, R_\infty, x, z, \varphi, P$ То же
4	а б	I, B, l I, B, l, δ	i_q, H, b То же	$w, d, \theta, R_0, R_\infty, x, z, \varphi, P$ То же

Расчет. Вариант 1, а. По индукции B из кривых рис. 2 находим ρ_R , ρ_x , $\tan \theta = \frac{\rho_x}{\rho_R}$. Число витков определяем по (12).

Пользуясь (13) и (25), находим связь между коэффициентом заполнения f_m и диаметром голого провода d :

$$f_m = \frac{\pi \omega \delta d^2}{H(\pi \omega d^2 i_q - 2 \epsilon \delta)} = \varphi(d), \quad (18)$$

где $\delta = 2\rho B$.

В этом выражении коэффициент заполнения зависит не только от диаметра провода, но еще и от магнитной индукции, характеристики магнитного материала, числа витков, плотности тока и ряда конструктивных параметров.

Задаваясь рядом значений d , строим кривую $f_m = \varphi(d)$. Точка ее пересечения с кривой для коэффициента заполнения обмоточного провода $f_m = f(d)$ дает искомые значения f_m и d (рис. 4). Зная диаметр провода, по плотности тока подсчитываем ток I .

Из (13) получаем среднюю длину магнитопровода l и находим:

$$L = \frac{1}{2}(l - \epsilon).$$

Учитывая (1), (8), (9) и (10), определяем активные сопротивления R_o и R_∞ , реактивное x , угол между током и напряжением катушки φ и потребляемую мощность P . Полное сопротивление катушки $z = U/I$ можно выразить еще иначе:

$$z = \sqrt{(R_o + R_\infty)^2 + x^2}. \quad (19)$$

Подсчитанные по этим уравнениям значения z должны давать одно и то же значение.

Вариант 1, б. Полное магнитное сопротивление и тангенс угла потерь цепи с воздушным зазором найдем из выражений

$$Z_p = \sqrt{(R_p + R_{p\delta})^2 + x_p^2}, \quad \tan \theta = \frac{x_p}{R_p + R_{p\delta}}; \quad (20)$$

здесь $R_{p\delta}$ — активное магнитное сопротивление воздушного зазора δ :

$$R_{p\delta} = \frac{\delta}{\sqrt{2\mu_0 S}}, \quad \mu_0 = 0,4\pi \cdot 10^{-8}. \quad (21)$$

Решая уравнения (13), (17) и (20), найдем коэффициент заполнения:

$$f_m = \frac{b_3 + \sqrt{b_3^2 + 4a_2 C_2}}{2a_2}; \quad (22)$$

здесь

$$a_2 = \left(\frac{H_i q k_1}{2B} \right)^2 - \left(R_{p\delta} + \rho_R \frac{\epsilon}{S} \right)^2 - \left(\rho_x \frac{\epsilon}{S} \right)^2; \\ b_2 = 2k_1 \left(\rho_x^2 \frac{\epsilon}{S} + \rho_R R_{p\delta} \right); \quad C_2 = (k_1 \rho_x)^2; \\ k_1 = \frac{\pi \omega d^3}{2HS}. \quad (23)$$

Число витков катушки можно определить по уравнению (12), полагая $\sin \theta = 0$, так как активное магнитное сопротивление цепи с воздушным зазором больше и углом потерь вполне можно пренебречь.

По (22) строим кривую $f_m = \varphi(d)$. Точка пересечения ее с кривой $f_m = f(d)$ дает искомые значения f_m и d .

Вариант 2, а. Расчет по этому варианту представляет интерес, когда используются готовые пластины (готовый штамп) и размеры a , l_0 и c (рис. 3) заданы.

Наряду с другими параметрами в этом варианте приходится определять толщину пакета сердечника b (рис. 3).

Из (13), (14) и (16) находим коэффициент заполнения меди

$$f_m = \frac{2B l_0 \rho_z}{i_q H(l - \epsilon)}. \quad (24)$$

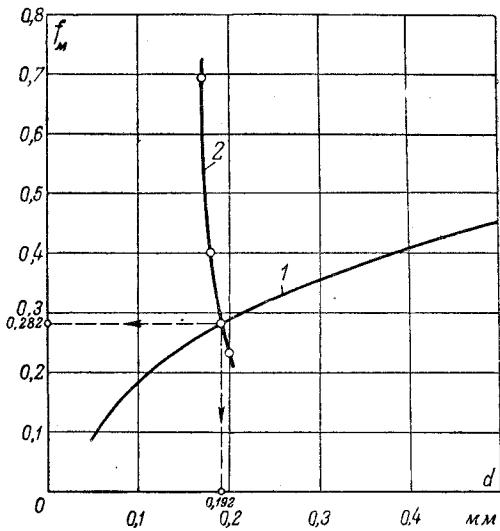


Рис. 4. К определению диаметра провода и коэффициента заполнения окна намотки медью для обмоточного провода марки ПШД. 1 — коэффициент заполнения обмоточного провода марки ПШД; $f_m = f(d)$; 2 — характеристика обмоточного провода рассчитываемой катушки $f_m = \varphi(d)$.

По f_m из кривых $f_m = f(d)$ [Л. 2] для определенного вида изоляции находим диаметр провода, а затем подсчитываем ток I и число витков w . Толщину пакета b определяем из (12), где коэффициенты

$$C_1 = \rho i_q (n_2 + 2b); \quad C_2 = n_1 b B; \quad (25)$$

здесь

$$n_1 = \frac{\omega a k_3}{\sqrt{2}}; \quad n_2 = \pi H + 2(a_1 + 2\Delta_3), \quad (26)$$

k_3 — коэффициент заполнения сталью пакета магнитопровода. Тогда

$$b = \frac{-b_3 \pm \sqrt{b_3^2 - 4a_3 C_3}}{2a_3}; \quad (27)$$

здесь

$$a_3 = \tau_1^2 + \tau_2^2 + 2\tau_1 \tau_2 \sin \theta; \quad b_3 = n_2 (\tau_1^2 + \tau_2 \tau_1 \sin \theta); \quad (28)$$

$$C_3 = \left(n_2 \frac{\tau_1}{2} \right)^2 - \left(\frac{U}{w} \right)^2, \quad (29)$$

где $\tau_1 = 2\rho i_q$, $\tau_2 = n_2 B$.

Если потери в стали малы ($\theta = 0$), уравнения (27) и (28) упрощаются. Когда $R_o = 0$, толщина пакета определяется исключительно просто:

$$b = \frac{\sqrt{2}U}{\omega w a B k_3}. \quad (30)$$

Зная I , S и B , легко определить R_p , x_p , R_o , R_∞ , x , φ и P .

Вариант 2, б. Из уравнений (13), (17), (20) и (21) находим коэффициент заполнения медью

$$f_m = \frac{2B m_o}{i_q H(l - \epsilon)},$$

где

$$m_o = \sqrt{\left(\rho_R l + \frac{\delta}{\sqrt{2\mu_0}} \right)^2 + (\rho_x l)^2}.$$

По f_m определяем d и I . Из (21) определяем число витков

$$w = \frac{B}{I} m_o.$$

Используя уравнение (27), подсчитываем толщину пакета b . Значение θ находим из уравнения

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{I \rho_x}{\rho_R l + \sqrt{\frac{\delta}{2 \mu_0}}}.$$

Расчет катушки тока. Ток в катушке откладываем по действительной оси комплексной плоскости (рис. 1,б). Поток Φ , как и в предыдущем случае, раскладываем на две составляющие: $\Phi = \Phi_r - j\Phi_a$. Если правую и левую части этого уравнения разделить на полную намагничивающую силу, то получится уравнение магнитных проводимостей, в котором полная магнитная проводимость

$$\dot{Y}_\mu = \frac{\Phi_r}{F} - j \frac{\Phi_a}{F} = g_\mu - jb_\mu, \quad (31)$$

где g_μ и b_μ — активные и реактивные проводимости (рис. 1,б). Электродвижущие силы

$$E_a' = \frac{\omega w^2}{\sqrt{2}} b_\mu l; \quad E_r' = \frac{\omega w^2}{\sqrt{2}} g_\mu l. \quad (32)$$

Напряжение на зажимах катушки

$$U = (IR_o + E_a') + jE_r' = IZ. \quad (33)$$

Затем можно определить активное и реактивное электрические сопротивления катушки

$$R = R_o + \frac{\omega^2 \omega}{\sqrt{2}} b_\mu = R_o + R_\sim; \quad (34)$$

$$x = \frac{\omega w^2}{\sqrt{2}} g_\mu. \quad (35)$$

Вариант 3,а. Используя уравнения (13), (14), (16), найдем расчетную формулу для числа витков:

$$w = \frac{\epsilon B \rho_z}{1(1 - 2\lambda B \rho_z)}. \quad (36)$$

Зная w , по (13) определим длину магнитопровода l , затем R_\sim и x_μ , а по (34) и (35) R_\sim , x . Остальные величины определяются просто.

Вариант 3,б. Совместное решение уравнений (13), (17) и (20) дает среднюю длину:

$$l = \frac{b_4 \pm \sqrt{b_4^2 - 4a_4 C_4}}{2a_4}; \quad (37)$$

здесь

$$a_4 = 1 - k_2 \rho_z^2; \quad b_4 = 2 \left(\epsilon + k_2 \frac{\delta}{\sqrt{2 \mu_0}} \rho_z \right),$$

$$C_4 = \epsilon^2 - k_2 \left(\frac{\delta}{\sqrt{2 \mu_0}} \right)^2, \quad (38)$$

где $k_2 = (2\lambda B)^2$. По уравнению (13) находим w .

Вариант 4,а. По (13) подсчитываем w и d . Задаваясь толщиной пакета магнитопровода b , по уравнениям (12), (25), (26), определяем U . Затем находим все остальные величины.

Вариант 4,б. Учитывая уравнения (13) и (20), число витков

$$w = \frac{B}{I} \sqrt{\left(\rho_R l + \frac{\delta}{\sqrt{2 \mu_0}} \right)^2 + (\rho_x l)^2}.$$

Выбирая величину b и определяя угол потерь θ , найдем U . Остальные величины определяются просто.

Приведенный метод пригоден и для расчета магнитных цепей, работающих при повышенной частоте. Требуется только пересчитать удельное реактивное магнит-

ное сопротивление на другую частоту, так как кривые рис. 2 даны для 50 гц. При повышенной частоте [Л. 7, 11]

$$\rho_{xf} = \rho_x - \rho_{xe} \left(1 - \frac{f}{f_o} \right), \quad (39)$$

ρ_x следует взять из рис. 2 при заданной индукции и частоте $f_o = 50$ гц; ρ_{xe} — реактивное удельное магнитное сопротивление, определяемое вихревыми токами в стали. Оно не зависит от частоты и для стали марки ЭИ-АА $\rho_{xe} = 0,341 \cdot 10^4$ см/гн.

Числовой пример. Рассчитать магнитную цепь и намагничивающую катушку, если заданы: напряжение $U = 100$ в, магнитная индукция в сердечнике $B = 15 \cdot 10^{-5}$ вб, $H = 10$ мм, $a = 10$ мм, $b = 12$ мм, $\Delta_1 = 1$ мм, $\Delta_2 = \Delta_3 = 1,5$ мм (рис. 3), $i_q = 300$ а/см².

1. Расчет ведем по первому варианту таблицы. Из рис. 2 для стали ЭИ-АА при $B = 15 \cdot 10^{-5}$ вб определяем $\rho_R = 8,5 \cdot 10^{-4}$ см/гн, $\rho_x \approx 1 \cdot 10^4$ см/гн и $\rho_z = \sqrt{\rho_R^2 + \rho_x^2} = 8,5 \cdot 10^{-4}$ см/гн. Угол потерь $\theta = \operatorname{arctg} \frac{1}{8,5} = 6^{\circ}45'$. Согласно (12) коэффициенты

$$C_1 = \rho i_q [2(a_1 + b_1) + \pi H] =$$

$$= 1,89 \cdot 10^{-6} \cdot 300 [2(2,3 + 1,5) + 1\pi] = 6,13 \cdot 10^{-3};$$

$$C_2 = \frac{2\omega B}{\sqrt{2}} S = \frac{2 \cdot 314 \cdot 15 \cdot 10^{-5}}{\sqrt{2}} \cdot 2,23 = 74 \cdot 10^{-3};$$

$$S = abk_3 = 1,0 \cdot 1,2 \cdot 0,927 = 2,23 \text{ см}^2.$$

Согласно (12) число витков

100

$$w = \frac{6,12 + 74^2 + 2 \cdot 6,1 \cdot 74 \sin 6^{\circ}45'}{100} = 1,33 \cdot 10^3.$$

2. Из (18) имеем коэффициент заполнения меди

$$f_m = \varphi(d) = \frac{t_1 d^2}{t_2 d^2 - t_3} = \frac{10,7 \cdot 10^4 d^2}{125,5 d^2 - 320};$$

здесь

$$t_1 = \frac{\pi w^2}{H} = \frac{\pi \cdot 1,33 \cdot 10^3 \cdot 25,6}{1} = 10,7 \cdot 10^4;$$

$$t_2 = \pi w i_q = \pi \cdot 1,33 \cdot 10^3 \cdot 300 = 125,5 \cdot 10^4;$$

$$t_3 = 2 \cdot \vartheta = 2 \cdot 6,24 \cdot 25,6 = 320.$$

$$\vartheta = 2 \cdot \rho_z B = 2 \cdot 8,54 \cdot 10^4 \cdot 15 \cdot 10^{-5} = 25,6; \quad \epsilon = 6,24.$$

Задаваясь различными значениями d , находим соответствующие значения f_m :

$d, \text{мм}$	f_m
0,17	0,69
0,18	0,398
0,20	0,235

Точка пересечения кривой $f_m = \varphi(d)$, построенной по этим данным, с кривой $f_m = f(d)$ (рис. 4), дает искомые значения:

$$d = 0,192 \text{ мм} \quad \text{и} \quad f_m = 0,282, \quad I = 8,68 \cdot 10^{-2} \text{ а.}$$

Согласно (13) средняя длина магнитопровода

$$l = \frac{Iw}{\rho_z B} = \frac{8,68 \cdot 10^{-2} \cdot 1,33 \cdot 10^3}{8,56 \cdot 10^4 \cdot 15 \cdot 10^{-5}} = 8,98 \text{ см.}$$

Магнитное сопротивление

$$R_\mu = \rho_R \frac{l}{S} = 8,5 \cdot 10^4 \frac{8,98}{2,23} = 3,42 \cdot 10^4 \left(\frac{1}{\text{гн}} \right);$$

$$x_\mu = \rho_x \frac{l}{S} = 1 \cdot 10^4 \frac{8,98}{2,23} = 4,02 \cdot 10^4 \left(\frac{1}{\text{гн}} \right).$$

Электрические сопротивления катушки

$$R_o = C_1 \frac{w}{I} = 6,1 \cdot 10^{-3} \frac{1 \cdot 33 \cdot 10^3}{8,68 \cdot 10^{-2}} = 93,5 \text{ ом.}$$

$$x_o = \frac{\omega \omega^2}{\sqrt{2} R_\mu} = \frac{314 \cdot 1,33^2 \cdot 10^6}{\sqrt{2} \cdot 34,2 \cdot 10^4} = 1145 \text{ ом};$$

$$R_\sim = x_o \sin \theta \cos \theta = 1145 \cdot 0,1175 \cdot 0,993 = 133 \text{ ом};$$

$$x = x_o \cos^2 \theta = 1,145 \cdot 0,993^2 = 1130 \text{ ом};$$

$$z = \sqrt{(R_o + R_\sim)^2 + x^2} = \sqrt{(93,5 + 133)^2 + 1130^2} = 1155 \text{ ом.}$$

Полное сопротивление еще можно определить так:

$$z = \frac{U}{I} = \frac{100}{8,68 \cdot 10^{-8}} = 1151 \text{ ом.}$$

Расхождение составляет меньше 0,5% и находится в пределах точности графоаналитического расчета.

Сдвиг фаз между током и напряжением

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{x}{R_o + R_\sim} = \frac{1130}{93,5 + 133} = 5,0; \quad \varphi = 78^\circ 43'.$$

Мощность катушки

$$P = UI = 100 \cdot 8,68 \cdot 10^{-8} = 8,68 \text{ вт.}$$

Литература

1. П. Л. Калантаров и Л. Р. Нейман. Теоретические основы электротехники, ч. II. Госэнергоиздат, 1949.
2. Б. С. Сотсков. Основы расчета и проектирования

элементов автоматических и телемеханических устройств. Госэнергоиздат, 1953.

3. М. А. Бабиков. Электрические аппараты. Госэнергоиздат, 1951.

4. Н. А. Лившиц, Д. В. Спицын и А. В. Данилин. Теория и расчет элементов автоматических систем. ГОНТИ, 1938.

5. А. Я. Буйлов. Основы электроаппаратостроения. Госэнергоиздат, 1946.

6. Ф. А. Ступель. Реле защиты и автоматики. Госэнергоиздат, ч. II, 1950.

7. Б. К. Буль. Аналитическое определение магнитных сопротивлений и потерь в стали. Электричество, № 5, 1950.

8. Б. С. Сотсков. Метод расчета магнитных цепей переменного тока. Автоматика и телемеханика, № 2, 1940.

9. Б. К. Буль. Методы расчета магнитных цепей с учетом магнитного сопротивления стали. Электричество, № 11, 1952.

10. М. И. Витенберг. Расчет обмоток электромагнитных реле переменного тока. Научно-технический сборник по электросвязи Ленинградского электротехнического института связи, вып. 2 (18), 1937.

11. Б. К. Буль. Дискуссия по статье Б. К. Буль „Аналитическое определение магнитных сопротивлений и потерь в стали“. Электричество, № 11, 1951

12. Б. К. Буль. К теории электромагнитного экранирования. Труды МЭИ им. Молотова, вып. XIII, 1953.

13. В. О. Арутюнов. Расчет и конструкции электрических измерительных приборов. Госэнергоиздат, 1949.

14. Б. К. Буль. Расчет сложной индукционной системы. Труды МЭИ им. Молотова, вып. VIII, 1952.

[22.4.1954]

◆ ◆

О некоторых явлениях взаимоиндукции в цепях со сталью

Доктор техн. наук, проф. Г. Н. ПЕТРОВ и кандидат техн. наук, доц. С. С. ОКУНЬ
Московский энергетический институт им. Молотова

При исследовании электромагнитных процессов в магнитно связанных цепях, например в трансформаторах или в автотрансформаторах, иногда в схемы замещения вводят отрицательные индуктивные и активные сопротивления [Л. 1].

Как известно, отрицательное индуктивное сопротивление соответствует емкости, а отрицательное активное сопротивление — генератору активной мощности. Появление таких элементов в схемах замещения чисто индуктивных устройств не всегда очевидно и требует разъяснений.

Рассмотрим вначале простейший случай [Л. 2, 3].

Предположим, что имеется замкнутый контур I (рис. 1, a), состоящий из активного сопротивления r и индуктивности L , питаемый от источника синусоидального переменного тока. Ваттметр P , приключенный к зажимам a и b (рис. 1, a), покажет:

$$P = UI_1 \cos \varphi = I_1^2 r.$$

В статье авторов «Об отрицательном сопротивлении вторичной обмотки трансформатора» (Электричество, № 5, 1950) указывалось, что при некоторых условиях индуктивное и активное сопротивления вторичной обмотки компенсированного трансформатора тока следует рассматривать как отрицательные. По просьбе ряда читателей журнала публикуется настоящая статья, где это явление рассмотрено более подробно.

Напряжение

$$\dot{U} = I_1(r + j\omega L) = I_1 r - \dot{E}_L,$$

где $\dot{E}_L = -j\omega L I_1$ — э. д. с. самоиндукции.

Допустим теперь (рис. 1, б), что катушка самоиндукции индуктивно связана с контуром 2 ,

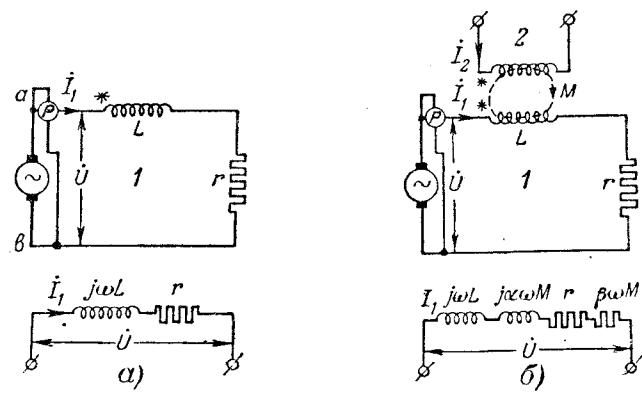


Рис. 1.

по которому протекает переменный ток I_2 , тогда в ней, кроме э. д. с. \dot{E}_L , будет наводиться э. д. с. взаимоиндукции $\dot{E}_m = -j\omega M\dot{I}_2$. В зависимости от амплитуды и фазы тока I_2 э. д. с. \dot{E}_m может быть больше или меньше э. д. с. \dot{E}_L и любым образом сдвинута относительно ее по фазе.

Тогда напряжение на зажимах источника тока

$$\dot{U} = \dot{I}_1(r + j\omega L) + j\dot{I}_2\omega M = \dot{I}_1 \left(r + j\omega L + j \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} \omega M \right).$$

Обозначим $\frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} = \alpha - j\beta$, тогда,

$$\dot{U} = \dot{I}_1 [(r + \beta\omega M) + j\omega (L + \alpha M)]. \quad (1)$$

Показание ваттметра будет:

$$P = UI_1 \cos \varphi = I_1^2 (r + \beta\omega M), \quad (2)$$

соответственно реактивная мощность

$$Q = UI_1 \sin \varphi = I_1^2 \omega (L + \alpha M). \quad (3)$$

Таким образом, рассмотрение изолированного контура 1 приводит к заключению, что введение в контур э. д. с. взаимоиндукции равносильно изменению его активного и реактивного сопротивления.

Если при изменении тока I_1 отношение $\frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1}$ остается постоянным ($\alpha = \text{пост}, \beta = \text{пост}$), то в схеме замещения контура 1 (рис. 1, б), помимо сопротивлений r и $j\omega L$, появляются постоянные активное сопротивление $\beta\omega M$ и реактивное $j\alpha\omega M$, которые могут быть как положительными, так и отрицательными, в зависимости от знака α и β .

Если β и α больше нуля, будет иметь место передача активной и реактивной мощностей из контура 1 в контур 2 через магнитное поле взаимоиндукции; при отрицательных значениях β и α активная и реактивная мощности из контура 2 будут передаваться в контур 1.

Дополнительные явления, связанные с насыщением и магнитными потерями, возникают в магнитно связанных цепях, когда поля самоиндукции и взаимоиндукции создаются в стальном сердечнике, в котором имеются магнитные потери.

Рассмотрим случай, когда контуры 1 и 2 объединены в один путем последовательного встречного их включения, т. е. $\dot{I}_1 = -\dot{I}_2$, $\alpha = -1$, $\beta = 0$. Такие случаи могут иметь место в трансформаторах и в автотрансформаторах.

Предположим (рис. 2), что на замкнутом стальном сердечнике расположены две катушки 1 и 2, соединенные встречно. В общем случае число витков $w_1 \geq w_2$. Допустим, что $w_1 > w_2$, тогда н. с. $F_1 = I_1 w_1$ больше н. с. $F_2 = I_2 w_2$, и магнитный поток в сердечнике создается результатирующей н. с.

$$F = F_1 + F_2,$$

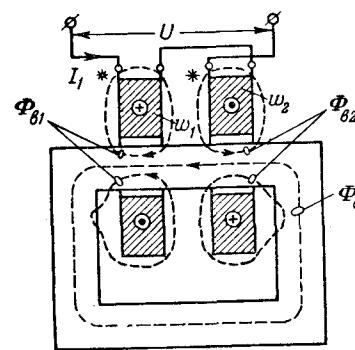


Рис. 2.

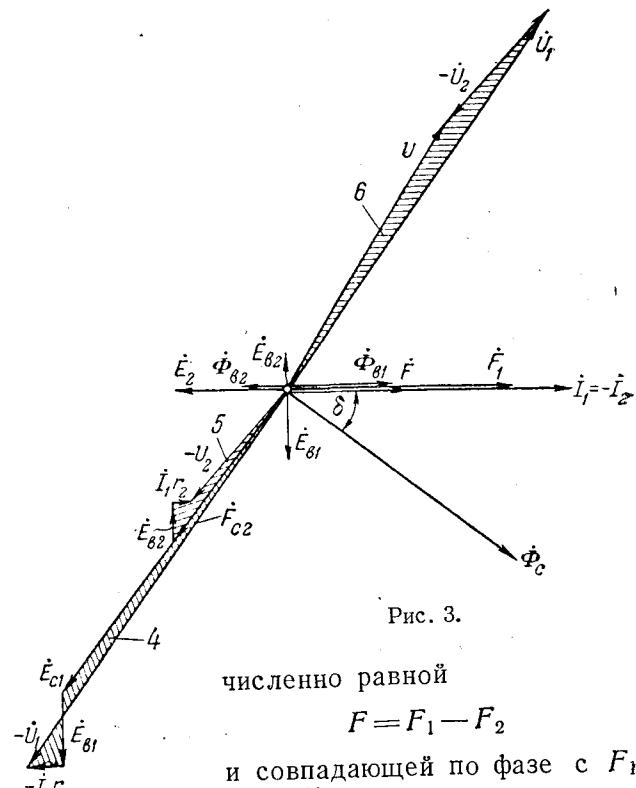


Рис. 3.

численно равной

$$F = F_1 - F_2$$

и совпадающей по фазе с F_1 (рис. 3).

Рассмотрим раздельно магнитные потоки, образуемые индукционными линиями, целиком проходящими по стальному сердечнику (Φ_c) и сцепленными с витками обеих катушек, и потоки Φ_{B1} и Φ_{B2} , образуемые индукционными линиями, проходящими главным образом по воздуху и сцепленными раздельно с витками катушек 1 и 2.

Вследствие наличия магнитных потерь вектор потока Φ_c отстает по фазе от вектора F на угол δ , тогда как векторы Φ_{B1} и Φ_{B2} можно считать практически совпадающими по фазе соответственно с векторами F_1 и F_2 .

Уравнение э. д. с. для катушки 1 (рис. 2) можно записать в следующем виде:

$$j\omega w_1 \dot{\Phi}_c + j\omega w_1 \dot{\Phi}_{B1} + I_1 r_1 = \dot{U}_1$$

или

$$-E_{c1} - E_{B1} + I_1 r_1 = \dot{U}_1, \quad (4)$$

так как $\dot{E}_{c1} = -j\omega w_1 \dot{\Phi}_c$ и $\dot{E}_{e1} = -j\omega w_1 \dot{\Phi}_{e1}$, где ω — угловая частота тока.

Для катушки 2, по которой протекает ток $I_2 = -I_1$, соответственно будем иметь:

$$j\omega w_2 \dot{\Phi}_c + j\omega w_2 \dot{\Phi}_{e2} - I_1 r_2 = \dot{U}_2$$

или

$$-\dot{E}_{c2} - \dot{E}_{e2} - I_1 r_2 = \dot{U}_2. \quad (5)$$

Так как катушки 1 и 2 соединены встречно, то общее напряжение сети

$$\dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2. \quad (6)$$

По уравнениям (4), (5) и (6) была построена векторная диаграмма рис. 3.

Баланс активных и реактивных мощностей можно найти, проектируя векторы \dot{U} , \dot{U}_1 , \dot{U}_2 на направление оси OB , совпадающей с вектором тока I_1 , и на перпендикулярное направление OA (рис. 4). При этом будем иметь:

$$P = UI_1 \cos \varphi \equiv OB, \quad P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1 \equiv OB_1,$$

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 \equiv BB_1.$$

Эти активные мощности, измеряемые ваттметром по схеме рис. 4, связаны между собой равенством:

$$P = P_1 - P_2. \quad (7)$$

Следовательно, мощность P_1 , поглощаемая катушкой 1, частично расходуется на электрические потери $I_1^2 r_1$, частично на магнитные потери в стальном сердечнике ($E_{c1} - E_{e1}$) $I_1 \sin \delta$ и частично через магнитное поле передается катушке 2: $E_{c2} I_1 \sin \delta$. Часть этой последней мощности затрачивается на электрические потери $I_1^2 r_2$ в катушке 2, остальная часть $P_2 = U_2 I_1 \cos \varphi_2$ возвращается электрическим путем источнику тока. Таким образом, общий баланс мощности источника тока будет: $P = P_1 - P_2$.

Аналогичные соотношения связывают реактивные мощности:

$$Q = UI_1 \sin \varphi \equiv OA, \quad Q_1 = U_1 I_1 \sin \varphi_1 \equiv OA_1,$$

$$Q_2 = U_2 I_1 \sin \varphi_2 \equiv AA_1,$$

поэтому

$$Q = Q_1 - Q_2. \quad (8)$$

Следовательно, реактивная мощность Q , отдаваемая источником тока, также меньше мощности Q_1 , поглощаемой катушкой 1, а реактивная мощность катушки 2 имеет отрицательный знак, т. е. она возвращается источнику тока.

Из сопоставления векторных диаграмм рис. 3 и 4 следует, что

$$OB_1 = E_{c1} \sin \delta + I_1 r_1 = I_1 (r_{c1} + r_1);$$

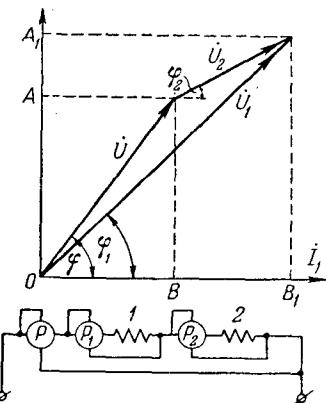


Рис. 4.

$$BB_1 = E_{c2} \sin \delta - I_1 r_2 = I_1 (r_{c2} - r_2),$$

где эквивалентные активные сопротивления $r_{c1} = \frac{E_{c1}}{I_1} \sin \delta$ и $r_{c2} = \frac{E_{c2}}{I_1} \sin \delta$ обусловлены магнитными потерями и при их отсутствии ($\delta = 0$) равны нулю.

Полное эквивалентное активное сопротивление всего устройства

$$r = \frac{U \cos \varphi}{I_1} = \frac{OB_1 - BB_1}{I_1} = (r_{c1} + r_1) + (-r_{c2} + r_2) = r' + r''. \quad (9)$$

Аналогично могут быть найдены реактивные сопротивления

$$OA_1 = E_{c1} \cos \delta + E_{e1} = I_1 (x_{c1} + x_1),$$

$$AA_1 = E_{c2} \cos \delta - E_{e2} = I_1 (x_{c2} - x_2),$$

где $x_{c1} = \frac{E_{c1}}{I_1} \cos \delta$, $x_{c2} = \frac{E_{c2}}{I_1} \cos \delta$ — эквивалентные реактивные сопротивления, обусловленные магнитным потоком сердечника;

x_1 и x_2 — реактивные сопротивления, обусловленные потоками Φ_{e1} и Φ_{e2} .

Полное эквивалентное реактивное сопротивление всего устройства

$$x = \frac{U \sin \varphi}{I_1} = \frac{OA_1 - AA_1}{I_1} = (x_{c1} + x_1) + (-x_{c2} + x_2) = x' + x''. \quad (10)$$

На основании равенств (9) и (10) можно получить электрическую схему замещения всего рассматриваемого устройства, изображенную на рис. 5.

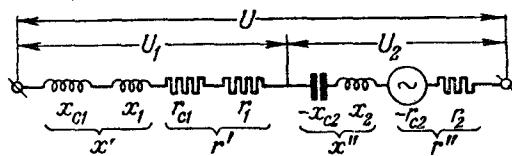


Рис. 5.

Полное эквивалентное активное сопротивление катушки 2 в схеме замещения

$$r'' = -r_{c2} + r_2 = -\frac{E_{c2}}{I_1} \sin \delta + r_2. \quad (11)$$

Поэтому при $\sin \delta = \frac{I_1 r_2}{E_{c2}}$ сопротивление $r'' = 0$, при $\sin \delta < \frac{I_1 r_2}{E_{c2}}$ $r'' > 0$ и при $\sin \delta > \frac{I_1 r_2}{E_{c2}}$ $r'' < 0$.

Таким же образом определяется знак индуктивного сопротивления катушки 2:

$$x'' = -x_{c2} + x_2 = -\frac{E_{c2}}{I_1} \cos \delta + x_2. \quad (12)$$

При $\cos \delta = \frac{I_1 x_2}{E_{c2}}$ сопротивление $x'' = 0$; при $\cos \delta < \frac{I_1 x_2}{E_{c2}}$ $x'' > 0$ и при $\cos \delta > \frac{I_1 x_2}{E_{c2}}$ $x'' < 0$.

Если соблюдены одновременно условия $\sin \delta = \frac{I_1 r_2}{E_{c2}}$ и $\cos \delta = \frac{I_1 x_2}{E_{c2}}$ и, следовательно, $\operatorname{tg} \delta = \frac{r_2}{x_2}$, то полное эквивалентное сопротивление катушки 2 равно нулю и при наличии тока в катушке $U_2 = 0$. В этом случае катушка 2 ведет себя в цепи тока как идеальный бифиляр, выполненный из сверхпроводника.

В таблице приведены результаты опытного исследования двух катушек трансформатора, размещенных на общем замкнутом стальном сердечнике и соединенных встречно, как это указано на рис. 2.

Ваттметры включались по схеме рис. 4. Соотношение витков при опыте было $\frac{w_1}{w_2} = 1,6$. Путем изменения тока I_1 (напряжения U) менялись н. с. F и магнитный поток Φ_c , что приводило к изменению насыщения сердечника и угла δ .

I_a	$U, \text{ в}$	$U_1, \text{ в}$	$U_2, \text{ в}$	$P_1, \text{ вт}$	$P_2, \text{ вт}$	$r'', \text{ ом}$	$x'', \text{ ом}$
2,5	32	83	51	32	84	52	-8,32
3,5	39	100	62	44	116	72	-5,88
5,0	46	119	73	60	152	92	-3,68

В таблице также указаны вычисленные по данным опытов значения эквивалентных активного r'' и реактивного x'' сопротивлений катушки 2. При включении последовательно с катушкой 2 добавочного активного сопротивления $\Delta r = -r''$ можно получить $P = P_1$ и $P_2 = 0$, где P_2 — активная мощность, измеренная на зажимах катушки 2 и добавочного сопротивления Δr .

Рассмотренные примеры показывают, что в замкнутом электрическом контуре, отдельные элементы которого магнитно связаны между собой, происходит частичная передача активной и реактивной мощности от элемента к элементу через магнитное поле. В схемах замещения таких контуров могут поэтому появляться как положительные, так и отрицательные активные и реактивные сопротивления при условии, что суммарное активное сопротивление контура будет всегда положительным, так же, как суммарное реактивное сопротивление, если в контуре отсутствует реальная емкость.

Литература

1. Г. Н. Петров, С. С. Окунь. Об отрицательном сопротивлении вторичной обмотки трансформатора. Электричество, № 5, 1950.

2. К. А. Круг и др. Основы электротехники. Госэнергоиздат, 1952, стр. 123 — 125.

3. К. М. Поливанов. Показания ваттметра и применение теоремы Умова к электрическим и магнитным цепям. Труды МЭИ, вып. IX. Госэнергоиздат, 1952.

18. 5. 1954

◆ ◆ ◆

Выбор импульсного уровня изоляции аппаратов и трансформаторов 400 кв

Доктор техн. наук М. В. КОСТЕНКО, кандидат техн. наук И. Ф. ПОЛОВОЙ
Ленинградский политехнический институт им. Калинина,

Инж. А. Н. ШЕРЕНЦИС

Теплоэлектропроект

В 1949 г. Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина (ВЭИ) составил и обсудил с другими организациями «Руководящие указания по уровням изоляции для проектирования установок напряжением 400 кв переменного тока», в которых даны значения испытательных напряжений аппаратов и трансформаторов, принятые ВЭИ при разработке ряда изоляционных конструкций 400 кв.

Для проверки рекомендованных ВЭИ импульсных уровней изоляции в 1950—1952 гг. были поставлены специальные работы по исследованию грозозащиты подстанций 400 кв. По поручению и при участии Теплоэлектропроекта эти работы велись в ВЭИ и в лаборатории ТВН ЛПИ им. Калинина. Исследования ЛПИ проводились в порядке продолжения и развития работ по исследованию грозозащиты подстанций 400 кв, проводившихся в ЛПИ под руководством А. А. Горева в 1939—1941 гг.

Результаты последних работ ЛПИ излагаются в настоящей статье¹.

Расчеты показывают, что грозоупорность линий 400 кв будет порядка 200—300 ка при сопротивлении заземления опор 9—6 ом. Удары молнии с амплитудой тока, превышающей эти значения, весьма маловероятны. Опыт эксплуатации линий 220 кв в энергосистемах СССР показывает, что при защитном угле трос — провод на опоре порядка 20° весьма мала также и вероятность прорыва молнии на провода мимо тросов.

Однако, учитывая исключительную ответственность установок 400 кв и большую длину линий, необходимо принять все меры для предотвращения повреждения аппаратов и особенно трансформаторов даже в отдельных случаях прихода на подстанции опасных волн вследствие прорыва молнии или обратного перекрытия с троса на провод. Применение разрядников позволяет обеспечить высокую надежность грозозащиты

Рассматривается методика решения задачи о выборе импульсного уровня изоляции высоковольтных аппаратов и трансформаторов на примере подстанций 400 кв. Показывается необходимость всестороннего подхода к вопросу с учетом как важности бесперебойной работы установок, так и сравнительно низкой вероятности прихода на подстанции волн атмосферного перенапряжения с линий, имеющих высокий уровень грозоупорности.

оборудования подстанций 400 кв при значительном снижении импульсного уровня изоляции аппаратов и трансформаторов.

При наличии разрядников защита оборудования обеспечивается с гашением кривого фронта грозовых волн, набегающих с линий передачи. Для сглаживания фронта оказывается достаточной длина пробега волн по проводам порядка 1—2 км. При отсутствии разрядников защита оборудования подстанций требует, чтобы амплитуда грозовых волн, приходящих с линий, не была выше определенных значений, значительно меньших импульсной прочности изоляции линий. Для уменьшения амплитуды волны, пропущенной изоляцией линии, требуется длина пробега по линии в несколько десятков километров. Соответственно повышается вероятность повреждения оборудования. Поэтому защиту подстанций 400 кв вентильными разрядниками следует считать обязательной. Все изложенные ниже результаты относятся именно к случаю подстанций с защитными разрядниками.

Импульсный уровень изоляции аппаратуры и трансформаторов следует выбирать с учетом ряда факторов: характеристик защитных разрядников, числа разрядников и их удаления от оборо-

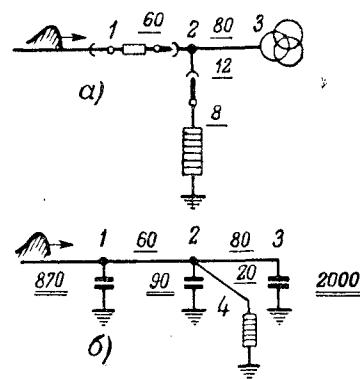


Рис. 1. Принципиальная (а) и упрощенная эквивалентная (б) схемы тупиковой подстанции, выполненной по схеме блока линия — трансформатор.

Одной чертой подчеркнута длина проводов (м); двойной чертой — эквивалентные емкости (пкф).

¹ Общее руководство было возложено на проф. А. А. Горева. Кроме авторов, в работах участвовали сотрудники лаборатории ТВН ЛПИ А. Г. Ляпин, А. С. Федотов, И. В. Черняев, Б. М. Шмелькин, О. В. Щербачев и инженер Теплоэлектропроекта К. П. Кадомская.

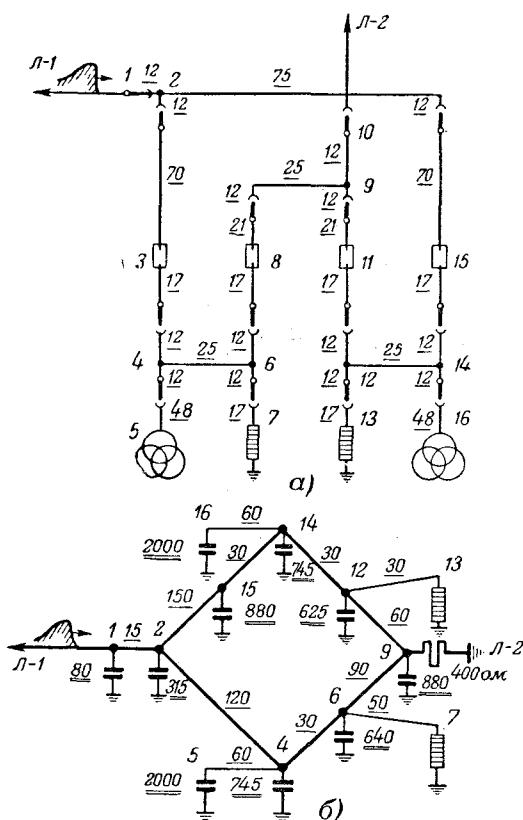


Рис. 2. Принципиальная (а) и упрощенная эквивалентная (б) схемы проходной и тупиковой (отключена Л-2) подстанций, выполненной по схеме многоугольника.

Одной чертой подчеркнута длина проводов (м); двойной чертой подчеркнуты эквивалентные емкости (пкФ).

дования, конструктивных размеров подстанций и грозозащиты линий на подходах к подстанциям.

Учет высокого уровня грозоупорности линий 400 кв особенно важен, так как это позволяет избежать излишних затрат при неоправданном увеличении запасов электрической прочности изоляции.

В лаборатории ТВН ЛПИ было проведено исследование на моделях грозовых перенапряжений для четырех типов подстанций 400 кв.

Принципиальная и упрощенная эквивалентная схемы двух из них даны на рис. 1 и 2. Основные исследования проводились при разных импульсных уровнях для проходной подстанции, выполненной по схеме многоугольника (рис. 2), а для других подстанций были выполнены только контрольные испытания.

Теория, описание, конструкция модели (анализатора грозозащиты ЛПИ) и правила составления эквивалентных схем описаны [Л. 1, 2 и 3].

Постановка и методика решения задачи. Под импульсным уровнем изоляции здесь понимается величина импульсных перенапряжений, допустимых для аппаратов и трансформаторов в эксплуатации. Такое определение наиболее удобно при проверке надежности схем грозозащиты аппаратов и трансформаторов и одновременно может служить отправным пунктом при установлении импульсных испытательных напряжений изоляции.

Исследования перенапряжений на моделях многочленных схем подстанций разных напряжений (от 35 до 400 кв) устанавливают для подстанций с вентильными разрядниками два следующих обстоятельства:

1. Волны грозовых перенапряжений, приходящие с линий электропередачи, вызывают в различных точках подстанции перенапряжения разной величины. На каждой подстанции имеются определенные опасные точки, в которых возникают наибольшие перенапряжения.

2. Перенапряжения в опасных точках подстанций имеют колебательный характер. Максимальные значения перенапряжений имеют различные значения в разных точках и наступают в разные моменты времени в зависимости от крутизны фронта грозовых волн. Поэтому импульсный уровень изоляции при исследовании грозозащиты подстанций необходимо определять кривой, ограничивающей амплитуды допустимых перенапряжений для времени до 10...12 мксек, когда колебания перенапряжений в опасных точках практически полностью затухают.

Импульсный уровень изоляции характеризовался кривой, проходящей через две точки: U_2 — амплитуды максимумов допустимых колебательных перенапряжений при времени $t = 2$ мксек и U_8 — то же, но при времени $t = 8$ мксек. При этом выдерживалось характерное для советской аппаратуры соотношение $U_8 \approx U_{50\%} \approx 0,8U_2$.

При времени $t > 2$ мксек форма кривой определена по аналогии с вольтсекундной характеристикой изоляции (рис. 3). При исследовании предельно допустимыми перенапряжениями считались такие, которые достигали хотя бы в одной точке кривой импульсного уровня изоляции (рис. 3), но не превосходили значений этой кривой.

Для заданной подстанции по осциллограммам перенапряжений можно построить кривую «опасных волн» (ABC, рис. 4), которая разделяет все возможные амплитуды напряжения приходящих волн U и длины их фронта t на две области: область опасных волн (выше кривой ABC) и область безопасных волн (ниже кривой ABC).

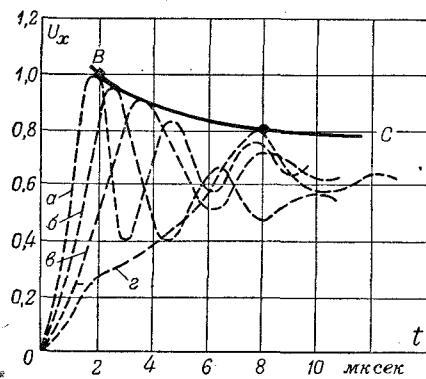


Рис. 3. Определение импульсного уровня изоляции.

ABC — кривая импульсного уровня изоляции, ограничивающая амплитуды допустимых перенапряжений на подстанции в эксплуатации; a, b, c, d, e, f, g — примеры осциллограмм кривых импульсных перенапряжений на трансформаторах различных подстанций при приходе с линий грозовых волн с различной крутизной фронта.

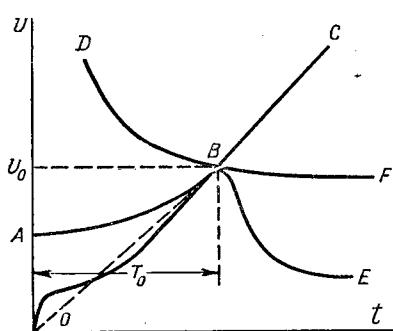


Рис. 4. Определение необходимой длины подхода.

ABC — кривая опасных волн подстанции; DBF — вольтсекундная характеристика изоляции линии на подходе; OBE — деформированная грозовая волна; OB — спрямленный фронт безопасной волны; T_0 — максимальное необходимое смещение фронта прямоугольной волны, при котором деформированная волна располагается целиком ниже кривой опасных волн; U_0 — амплитуда волны, отвечающая максимальному необходимому смещению фронта.

Опасными считаются грозовые волны, приходящие с линий передачи и вызывающие в наиболее опасных точках подстанции перенапряжения, превосходящие заданный импульсный уровень изоляции аппаратуры или трансформатора [Л. 3 и 4].

Пользуясь кривой опасных волн, можно определить необходимую длину подхода линий к подстанции, как участка линий вблизи подстанции, удары молний в который могут вызвать приход на подстанцию опасных волн.

При прорыве на провод мимо тросов, а также при обратном перекрытии с опоры на провод, по проводу линии от места поражения к подстанции распространяется волна, напряжение которой ограничено вольтсекундной характеристикой изоляции линии на подходе (DBF, рис. 4), а крутизна фронта этой волны может быть весьма большой.

Требуется обеспечить такое искажение фронта волны, чтобы дошедшая до подстанции волна лежала ниже кривой опасных волн (ABC, рис. 4).

При небольших длинах пробега (до 5 км) и напряжении волны, значительно превосходящем коронное напряжение провода, сглаживание фронта волны обусловлено главным образом импульсной короной.

Можно показать, что наиболее опасно для подстанций возникновение на проводе в месте удара молний прямоугольной волны с амплитудой U_0 (рис. 4), соответствующей точке пересечения кривых ABC и DBF. Тогда потребуются наибольшее сглаживание фронта волны и, следовательно, наибольшая длина пробега. Кривая OBE показывает искажение фронта волны при распространении по линии (рис. 4). Дополнительные исследования² показали, что такая волна вызывает на подстанции практически такие же перенапряжения, как волна со спрямленным коугольным фронтом (OB).

Получается следующая приближенная формула³ [Л. 4] для вычисления необходимой длины подхода (км):

$$l_n \approx \frac{0,3 \cdot T_0}{1,15 \sqrt{1 + \frac{4U_0}{h_{cp}}} - 1}, \quad (1)$$

здесь h_{cp} — средняя высота провода над поверхностью земли, м;

U_0 — амплитуда волны (мв), определяемая по точке пересечения кривой опасных волн с вольтсекундной характеристикой изоляции линии;

T_0 — максимальное необходимое смещение фронта волны (мксек), определяемое по точке B (рис. 4).

Какие угодно удары молний в линию за пределами найденной указанным способом длины подхода не представляют опасности для изоляции подстанции.

При одинаковой конструкции и изоляции отходящих линий надежность грозозащиты подстанции будет тем ниже, чем больше для нее необходимая длина подхода, в пределах которого прорывы молний на провод или обратные перекрытия могут вызвать приход на подстанцию опасных волн. Для правильной сравнительной оценки надежности грозозащиты подстанций разных классов напряжения при различных конструкциях линий необходимо дополнительно учесть вероятности прорыва или обратного перекрытия.

Произведенный в настоящей работе выбор импульсного уровня изоляции аппаратов и трансформаторов 400 кв основан на детальном исследовании перенапряжений в разных точках конкретных подстанций 400 кв при приходе на подстанцию грозовых волн с самыми различными значениями амплитуды и крутизны фронта. По результатам этих исследований были построены кривые опасных волн и по ним вычислены необходимые длины подхода, соответствующие различным уровням изоляции аппаратов и трансформаторов. Оказалось, что при определенном уменьшении интервала между характеристиками разрядников и уровнем изоляции аппаратов и трансформаторов имеет место резкое увеличение необходимой длины подхода и соответственно резкое снижение надежности грозозащиты подстанций. Этот предел и определил необходимый уровень изоляции аппаратов и трансформаторов.

Кроме того, в приложении произведено сравнение надежности грозозащиты подстанций

³ Практически $\frac{4U_0}{h_{cp}} \ll 1$ и l_n можно вычислить по приближенной формуле, дающей ту же точность, что и формула (1):

$$l_n \approx \frac{T_0}{0,5 + \frac{8U_0}{h_{cp}}}.$$

Эта формула соответствует приближенной формуле для оценки искажения фронта, рекомендуемой в „Руководящих указаниях по защите от перенапряжений“, изд. 1954 г.

² Инж. К. П. Кадомский под руководством М. В. Констанко, 1950, лаборатория ТВН ЛПИ.

400 кв и подстанций 220, 110 и 35 кв, для которых в энергосистемах СССР в настоящее время применяются схемы, оправдавшие себя на практике и обеспечивающие удовлетворительную надежность грозозащиты.

Результаты исследования на моделях. Количество разрядников на подстанциях определялось, исходя из необходимости обеспечить защиту не только трансформаторов, но и всей аппаратуры. Трансформаторы являются наиболее ответственным элементом подстанции, и поэтому расстояние до ближайших к ним разрядников выбиралось минимально возможное по конструктивным соображениям.

В работе были приняты следующие характеристики вентильных разрядников 400 кв: импульсное пробивное напряжение искровых промежутков (U_{np}) не выше 1200 кв, остающееся напряжение при токе 8 ка (U_{ost}) не выше 1200 кв, коэффициент вентильности $\alpha = 0,17$.

Защитное действие нескольких разрядников получалось на модели с учетом уменьшения импульсного тока через каждый разрядник и при соответствующем уменьшении остающегося напряжения.

Для исследованных подстанций предварительно были определены наиболее опасные точки и построены кривые опасных волн при разных импульсных уровнях изоляции. Например, для тупиковой подстанции «блок линия — трансформатор» (рис. 1) наиболее опасными оказались точка 3 присоединения трансформатора и точка 1 присоединения аппаратуры (рис. 1). Для проходной и тупиковой подстанции по схеме многоугольника (рис. 2) наиболее опасными оказались точка 5 и точка 1.

Многочисленные опыты на моделях подстанции 400 кв, а также и подстанций 35, 110 и 220 кв

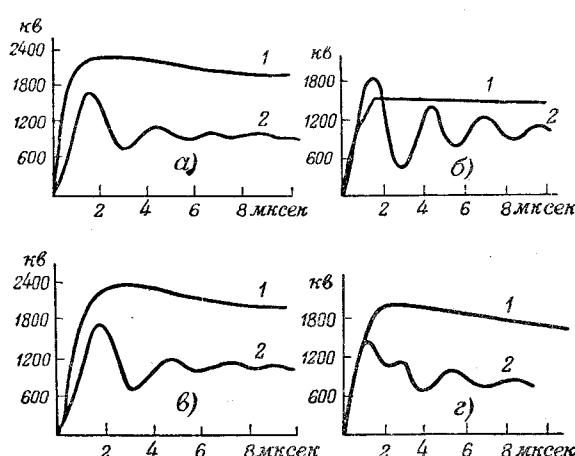


Рис. 5. Осциллограммы характерных перенапряжений на моделях подстанций 400 кв.

а — приходящая с линии грозовая волна 1 и перенапряжение на трансформаторе 2 на проходной подстанции, выполненной по схеме многоугольника (для точки 16 схемы рис. 2); б — то же на тупиковой подстанции, выполненной по схеме блока линия — трансформатор (для точки 3 схемы рис. 1); в — то же на проходной подстанции, выполненной по схеме многоугольника (для точки 5 схемы рис. 2); г — приходящая волна 1 и перенапряжение на линейном выключателе 2 тупиковой подстанции, выполненной по схеме блока линия — трансформатор (для точки 1 схемы рис. 1).

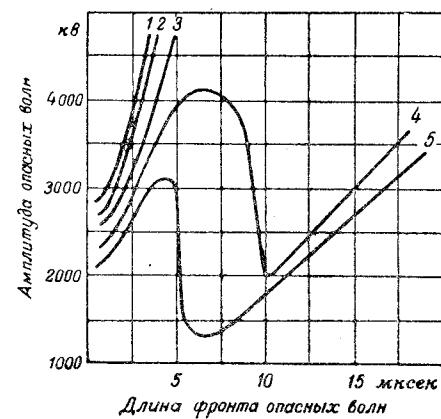


Рис. 6. Кривые опасных волн для силового трансформатора на проходной подстанции 400 кв, выполненной по схеме многоугольника (для точки 5 схемы рис. 2) при импульсных уровнях изоляции, приведенных в таблице.

показывают, что, как правило, наибольшие перенапряжения возникают на трансформаторе, наиболее удаленном от ближайшего к нему разрядника, и на линейном выключателе той линии, по которой приходит грозовая волна.

Характерные осциллограммы перенапряжений в наиболее опасных точках подстанций приведены на рис. 5. Кривые опасных волн снимались отдельно для трансформаторов и для аппаратов, так как учитывалось, что вследствие старения изоляции на трансформаторах могут быть допущены перенапряжения, меньшие, чем на изоляции аппаратов. Кривые опасных волн для схемы рис. 2 приведены на рис. 6. Для полученных из экспериментов кривых опасных волн по формуле (1) были определены значения необходимой длины подхода l_n . Эти результаты приведены в таблице.

Импульсные уровни изоляции и необходимые длины подхода

Подстанция	Импульсный уровень изоляции, кв		Необходимая длина подхода, км	Номер кривой на рис. 6
	U_8	U_2		

Силовые трансформаторы

Проходная по схеме рис. 2	1 200	1 500	7,60	5
	1 300	1 625	2,20	4
	1 400	1 750	0,98	3
	1 500	1 875	0,80	2
	1 600	2 000	0,70	1
Тупиковая по схеме рис. 2	1 400	1 750	1,10	
Тупиковая по схеме рис. 1	1 400	1 750	3,4	

Для аппаратуры

Проходная по схеме рис. 2	1 200	1 500	11,30	
	1 300	1 625	7,35	
	1 400	1 750	5,10	
	1 500	1 875	0,71	
	1 600	2 000	0,66	
Тупиковая по схеме рис. 2	1 500	1 875	1,00	

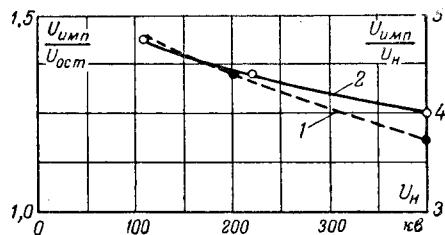


Рис. 7.

1 — отношение малоударного импульсного испытательного напряжения при полной волне для внешней изоляции аппаратов к номинальному напряжению; 2 — отношение малоударного импульсного испытательного напряжения при полной волне для внешней изоляции аппаратов к остающемуся напряжению вентильных разрядников в зависимости от номинального напряжения установок.

Из рис. 6 и из таблицы видно, что при определенном снижении импульсного уровня изоляции имеет место резкое изменение кривых опасных волн и увеличение необходимой длины подхода, т. е. длины опасной зоны, в пределах которой прямые удары молний в линию передачи могут привести к приходу на подстанцию опасных волн.

Кривые опасных волн и данные об изменении необходимой длины подхода позволяют судить о координации импульсного уровня изоляции аппаратуры и трансформаторов с характеристиками разрядников.

Однако для всесторонней оценки грозозащиты подстанций 400 кв необходимо дополнительно учесть грозозащиту линий на подходе и характеристики грозовой деятельности (вероятность прямых ударов молний и параметры тока молний). Представляет интерес сравнить надежность грозозащиты подстанций 400 кв и подстанций других номинальных напряжений. Такая попытка сделана в приложении.

На основании таблицы можно принять импульсный уровень изоляции для трансформаторов $U_8 = 1400$ кв, $U_2 = 1750$ кв и для аппаратуры $U_8 = 1500$ и $U_2 = 1875$ кв. Эти значения находятся на границе резкого увеличения необходимой длины подхода и уменьшения надежности грозозащиты подстанций. Поэтому принимать более низкие значения нецелесообразно.

Импульсный уровень изоляции соответствует допустимым перенапряжениям в эксплуатации. Для внешней изоляции он может совпадать со значением малоударного испытательного напряжения; для внутренней изоляции между испытательным напряжением и импульсным уровнем изоляции необходимо иметь интервал, учитывающий старение изоляции в эксплуатации. Если принять интервал около 7%, то импульсное испытательное напряжение для аппаратуры и для трансформаторов 400 кв будет одинаковым и равным $U_2 = 1875$ кв, $U_8 = 1500$ кв.

На рис. 7 приведено отношение импульсного испытательного напряжения внешней изоляции при полной волне к номинальному (кривая 1), а также к остающемуся напряжению на разряднике (кривая 2). Из рис. 7 следует, что с увеличением номинального напряжения коэффициент запаса электрической прочности изоляции уменьшается. При рекомендуемом импульсном уровне

изоляции аппаратуры и трансформаторов 400 кв этот коэффициент запаса понижается от 4,8 для установок 110 кв и 4,4 для 220 кв до значения 3,75 для установок 400 кв.

Одновременно имеет место относительное уменьшение интервала между импульсным уровнем изоляции и остающимся напряжением на разряднике, что приводит к облегчению требований к разряднику, но одновременно и к снижению их защитного действия. Рассматриваемое отношение снижается от значения 1,43 для установок 110 кв до значения 1,25 для установок 400 кв. В то же время, как следует из приложения, надежность грозозащиты подстанций 400 кв при рекомендуемых импульсных уровнях изоляции в 25...30 раз выше, чем для типовых подстанций 110 кв. Это объясняется значительно более высоким уровнем грозоупорности линий 400 кв и подтверждает необходимость выбора импульсного уровня изоляции не только по характеристикам разрядников, но также и с учетом всех остальных мероприятий, влияющих на грозозащиту подстанций.

Выводы. 1. Для установок 400 кв целесообразно иметь импульсный уровень изоляции, характеризующийся кривой допустимых в эксплуатации перенапряжений, проходящей через точки: для трансформаторов $U_8 = 1400$ кв, $U_2 = 1750$ кв; для аппаратов $U_8 = 1500$ кв, $U_2 = 1875$ кв. Импульсные испытательные напряжения можно принять одинаковыми для аппаратов и трансформаторов: $U_8 = 1500$ и $U_2 = 1875$ кв.

2. Рекомендуемый импульсный уровень изоляции, обеспечивающий высокую относительную надежность грозозащиты подстанций 400 кв, достигается при закономерной технико-экономической тенденции относительного снижения запасов изоляции с ростом номинального напряжения.

3. Дальнейшее снижение импульсного уровня изоляции может привести к резкому снижению надежности грозозащиты и не является поэтому целесообразным для установок 400 кв, безаварийная работа которых будет иметь важное народнохозяйственное значение.

4. Задача определения импульсного уровня изоляции аппаратов и трансформаторов требует подробного исследования перенапряжений на подстанциях. Применение специализированной модели, правильно и в определенных масштабах отображающей амплитуды и формы кривых перенапряжений на реальных подстанциях, является наиболее целесообразным способом решения этой задачи. При этом имеется возможность провести исследование в необходимом широком диапазоне изменения амплитуды и крутизны приходящих волн при различных схемах и конструкциях подстанций.

Приложение. Оценка сравнительной надежности грозозащиты подстанций.

С помощью кривой опасных волн можно определить вероятность β прихода с линий передачи на подстанцию опасных грозовых волн. Величина M , обратная β , характеризует надежность грозозащиты оборудования подстанций. Общий ход решения этой задачи изложен в [Л. 5].

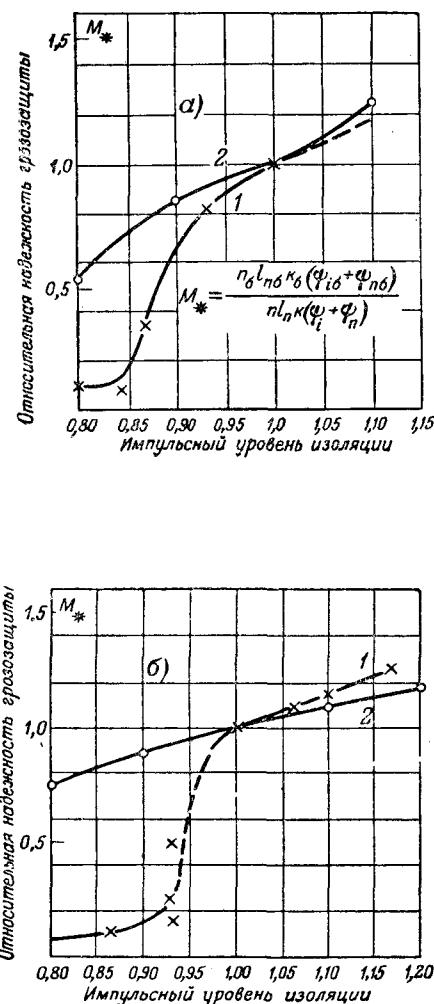


Рис. 8.

а — относительная надежность грозозащиты трансформаторов при разных импульсных уровнях изоляции на подстанциях 400 кв (1) и 110 кв (2); б — относительная надежность грозозащиты аппаратуры при разных импульсных уровнях изоляции на подстанциях 400 кв (1) и 110 кв (2).

n — число линий электропередачи, отходящих от подстанции; l_n — необходимая длина подхода (км); k — общее число ударов молнии в 1 км линии за год; ψ_i — вероятность тока молнии, превышающего уровень грозоупорности линии на подходе; ψ_n — вероятность прорыва молнии на провода мимо тросов

$$\left[k = \frac{1.2 h_{cp}}{100}, \lg (\psi_i \%) = 2 - \frac{I_0}{60}, \lg (\psi_n \%) = \frac{10}{10} - 3.7 \right]$$

(для кривых 1 все величины отнесены к уровню: $U_3 = 1500$ кв, $U_2 = 1875$ кв; для кривых 2: $U_3 = 530$ кв, $U_2 = 690$ кв).

Нами была предпринята попытка воспользоваться упрощенным решением в относительной форме. При решении полагалось, что все удары молнии в линию передачи в пределах необходимой длины подхода l_n , которые вызывают обратные перекрытия с опоры на провод, а также все прорывы молнии на провода мимо тросов в пределах l_n приводят к приходу на подстанцию опасных волн.

Тогда вероятность прихода на подстанцию опасных волн определяется по формуле

$$\beta = n l_n k (\psi_i + \psi_n). \quad (1)$$

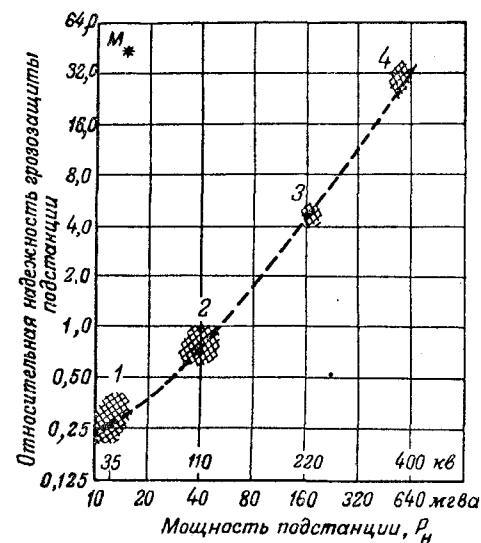


Рис. 9. Относительная надежность грозозащиты подстанций высокого напряжения в зависимости от их мощности. 1, 2, 3 и 4 — соответственно области значений, характерных для подстанций 35, 110, 220 и 400 кв (кривая проведена по средним точкам для подстанций 35, 110 и 220 кв).

На рис. 8 построены кривые относительной надежности грозозащиты оборудования M_* в зависимости от импульсного уровня изоляции по приведенной там же формуле.

Относительная надежность грозозащиты M_* обратно пропорциональна l_n . Поэтому кривые 1 рис. 8 возможно было построить непосредственно по данным таблицы. Кривые 2 строились на основе кривых опасных волн, полученных из специальных опытов на модели типовых подстанций 110 кв.

Рекомендуемый в статье импульсный уровень изоляции для трансформаторов соответствует на рис. 8 значению 0,93, а для аппаратуры — 1,0. Оба эти значения лежат на границе резкого снижения надежности грозозащиты оборудования.

Значения для рис. 9 были определены на основе данных эксплуатации и опытов на моделях. Данные рис. 9 являются лишь первым приближением в решении задачи обоснования схем грозозащиты и координации изоляции подстанций.

Литература

1. М. В. Костенко, В. М. Нашатырь и О. В. Щербачев. Принципы электрического моделирования для исследования переходных процессов и их приложения к вопросам грозозащиты. ЖТФ, т. 17, вып. 8, 1947.

2. М. В. Костенко, Г. Т. Мессерман и О. В. Щербачев. Анализатор грозозащиты подстанций. Труды ЛПИ, № 3, 1948.

3. Г. С. Кучинский, И. Ф. Половой, О. В. Щербачев. Оценка надежности грозозащиты подстанций высокого напряжения. Труды научно-технической сессии по перенапряжениям. Госэнергоиздат, 1950.

4. М. В. Костенко. Атмосферные перенапряжения и грозозащита высоковольтных установок. Госэнергоиздат, 1949.

5. Г. С. Кучинский и И. Ф. Половой. Вероятное число случаев отключений как критерий грозозащищенности подстанций высокого напряжения. Труды ЛПИ, № 3, 1948.

[16. 2. 1954]

◆ ◆ ◆

Электропривод широкого диапазона с внутренними обратными связями

Инж. С. А. БАХАРЕВ
Ленинград

Для рабочих машин, в которых необходимо менять скорость движений в широких пределах, применяется электропривод с двигателем постоянного тока и электромашинным усилителем поперечного поля.

По способу регулирования скорости данный электропривод можно разделить на два вида привода:

1. Электропривод, в котором заданный параметр регулируется по изменению величины этого же параметра. Этот принцип был впервые предложен русским механиком И. И. Ползуновым в 1765 г. Применительно к двигателю регулирование скорости по этому принципу осуществляется обратной отрицательной связью по скорости двигателя.

2. Электропривод, в котором заданный параметр регулируется в зависимости от изменения нагрузки. Принцип был предложен в 1829 г. французом Понселе. В двигателе регулирование скорости по данному принципу производ-

ится с помощью обратной связью по току нагрузки. Решение нашло применение в электроприводе для вспомогательных целей.

В электроприводе широкого диапазона с внутренними обратными связями применяются оба средства регулирования — обратная отрицательная связь по напряжению двигателя и обратная положительная связь по току нагрузки.

В 1950 г. электропривод с внутренними обратными связями был внедрен¹ на расточных станках типа ЛР-24 с полным диапазоном регулирования, равным 100. В 1951 г. принципиальная схема привода станков была усовершенствована. Помимо станкостроения, привод нашел применение и в других отраслях техники [Л. 1].

На рис. 1 показана принципиальная схема электропривода. Скоростью вращения исполнительного двигателя D управляет электромашинный усилитель $ЭМУ$. Усилитель имеет обмотки управления: независимого возбуждения $ОУ-1$, обратной отрицательной связи по напряжению $ОУ-2$, обратной положительной связи по току $ОУ-3$ и обмотку для противоколебательной связи, действие которой в данной статье не рассматривается. Ограничение тока достигается обратной отрицательной связью по току с отсечкой. Переменными сопротивлениями R_1 , R_2 , R_3 устанавливают скорость и жесткость механической характеристики привода.

Обратные отрицательные связи по напряжению. Достижению малой скорости вращения двигателя препятствуют нелинейность характеристик и напряжение остаточного намагничивания усилителя. Для уменьшения влияния этих факторов, а также для обеспечения заданной точности регулирования скорости применяется обратная отрицательная связь по напряжению.

Электродвижущая сила усилителя от независимого возбуждения

$$E_1 = k_{1c} U_c. \quad (1)$$

¹ В разработке привода участвовал А. М. Сучилин.

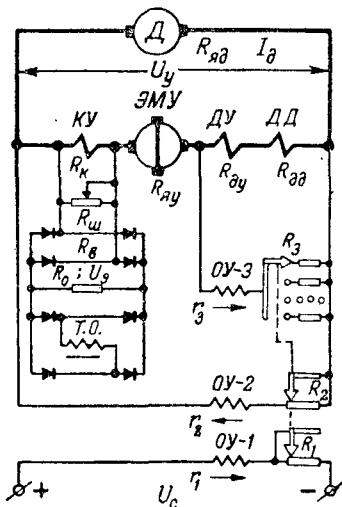


Рис. 1. Принципиальная схема электропривода широкого диапазона с внутренними обратными связями.

D — двигатель; $ДД$ — дополнительные полюсы двигателя; $ЭМУ$ — электромашинный усилитель; $КУ$, $ДУ$ — компенсационная обмотка и обмотка дополнительных полюсов усилителя; $ОУ-1$, $ОУ-2$, $ОУ-3$ — обмотки управления усилителя; R_1 , R_2 , R_3 — сопротивления переключателя скорости; R_{1a} , R_{2a} — прямое сопротивление селеновых вентилей; U_s — эталонное напряжение отсечки; U_y — напряжение усилителя; U_c — напряжение сети; TO — трансформатор питания.

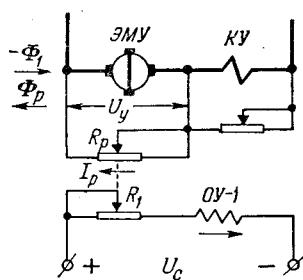


Рис. 2. Схема получения обратной отрицательной связи по напряжению за счет некомпенсированной реакции якоря усилителя.

R_p , I_p , Φ_p — переменное сопротивление, ток и магнитный поток обратной связи; $OY-1$, R_1 , Φ_1 — обмотка, переменное сопротивление и магнитный поток независимого возбуждения; KU — компенсационная обмотка ЭМУ.

Электродвижущая сила усилителя от отрицательной связи по напряжению

$$E_2 = k_{2c} U_y. \quad (2)$$

Здесь введены следующие коэффициенты: $k_1 = a_1 k_1$ — усиления цепи независимого возбуждения; $k_{2c} = a_2 k_2$ — усиления обратной отрицательной связи по напряжению; коэффициент $a_1 = \frac{r_1}{r_1 + R_1}$ — независимого возбуждения; $a_2 = \frac{r_2}{r_2 + R_2}$ — обратной связи по напряжению; $k_1 = \frac{c_1}{r_1}$, $k_2 = \frac{c_2}{r_2}$ — усиления усилителя по напряжению при возбуждении от обмоток $OY-1$, $OY-2$; $c_1 = \operatorname{tg} \alpha_1$, $c_2 = \operatorname{tg} \alpha_2$ — крутизны характеристики холостого хода усилителя.

Электромашические усилители изготавляются ненасыщенными до номинальной э. д. с. Поэтому k_1 и k_2 можно определить из равенства $k_1 = \frac{E_{y_n}}{r_1 I_{1n}}$ и $k_2 = \frac{E_{y_n}}{r_2 I_{2n}}$, где E_{y_n} — номинальная э. д. с. усилителя; I_{1n} , I_{2n} — номинальные токи обмоток $OY-1$, $OY-2$.

Глубина обратной связи определяется коэффициентом усиления обратной связи, который в статическом режиме равен произведению коэффициента усиления усилителя для обмотки управления на коэффициент обратной связи.

Обратную отрицательную связь по напряжению можно получить за счет реакции якоря усилителя, включив для этой цели сопротивление R_p на зажимы якоря усилителя до компенсационной обмотки рис. 2 [Л. 2]. Ток I_p образует магнитный поток некомпенсированной реакции якоря Φ_p . Этот поток направлен по продольной оси, против магнитного потока независимого возбуждения Φ_1 , и его воздействие пропорционально напряжению усилителя. Поэтому такое включение сопротивления R_p образует обратную отрицательную связь по напряжению, где обмоткой обратной связи является обмотка якоря.

Электродвижущая сила от отрицательной связи по напряжению, полученная за счет некомпенсированной реакции якоря,

$$E_p = k_{ac} U_y, \quad (3)$$

где $k_{ac} = a_2 k_2$ — коэффициент усиления;

$a_2 = \frac{R_{ay}}{R_p}$ — коэффициент обратной связи;

$k_2 = \frac{c_2}{R_{ay}}$ — коэффициент усиления усилителя по напряжению при возбуждении от обмотки якоря по продольной оси;

$c_2 = \operatorname{tg} \alpha_2$ — коэффициент крутизны характеристики холостого хода усилителя при возбуждении его с якорем по продольной оси.

Если приложить напряжение внешней сети U_c к зажимам якоря усилителя (до компенсационной обмотки), то на зажимах якоря появится э. д. с., действующая навстречу напряжению сети: $E_p = U_c - R_{ay} I_p$. По данному уравнению строится характеристика холостого хода $E_p = f(I_p)$ и определяется $k_2 = \frac{\operatorname{tg} \alpha_2}{R_{ay}}$. Другой практический способ определения k_2 состоит в следующем. Включают обмотку независимого возбуждения (рис. 2) и измеряют напряжение $U_{y1} = k_{1c} U_c \pm E_o$. Затем включают сопротивление R_p и измеряют ток I_p и напряжение $U_{y2} = k_{1c} U_c - k_2 R_{ay} I_p - R_{ay} I_p \pm E_o$.

Напряжение от некомпенсированной реакции якоря

$$U_p = U_{y1} - U_{y2} = (1 + k_2) R_{ay} I_p,$$

отсюда

$$k_2 = \frac{U_p}{R_{ay} I_p} - 1. \quad (4)$$

Обратная отрицательная связь по напряжению, полученная с помощью некомпенсированной реакции якоря усилителя, может использоваться для варьирования скорости двигателя, уменьшения напряжения остаточного намагничивания и других целей, особенно когда обмо-

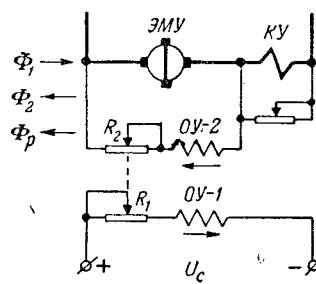


Рис. 3. Обратная отрицательная связь по напряжению суммарного действия (обмотка управления $OY-2$ и обмотка якоря).

ток управления недостаточно или когда коэффициент усиления отрицательной связи по напряжению от имеющихся обмоток мал.

Если обмотку обратной связи включить на зажимы якоря до компенсационной обмотки (рис. 3), то согласно (2) и (3) э. д. с. от отрицательной связи по напряжению суммарного действия (обмотки управления и обмотки якоря усилителя)

$$E_{2p} = (k_{2c} + k_{ac}) U_y. \quad (5)$$

Обратные положительная и отрицательная связи по току. Амперитки обратной отрицательной связи по напряжению возрастают при увеличении нагрузки двигателя, особенно на малой скорости двигателя. Прирост амперитков отрицательной связи по напряжению с нагрузкой компенсируется обратной положительной связью по току. Жесткость механической характеристики привода определяется главным образом тем, насколько положительная связь по току уравновешивает прирост амперитков отрицательной связи по напряжению. Обмотка обратной положительной связи по току включается параллельно дополнительным полюсам двигателя и усилителя.

Электродвижущая сила усилителя от положительной связи по току

$$E_3 = k_{3c} (R_{\partial y} + R_{\partial \partial}) I_{\partial}, \quad (6)$$

где $k_{3c} = a_3 k_3$ — коэффициент усиления обратной положительной связи по току;

$k_3 = \frac{E_{y_n}}{r_3 f_{3n}}$ — коэффициент усиления при возбуждении от обмотки ОУ-3;

$a_3 = \frac{r_3}{r_3 + R_3}$ — коэффициент обратной связи по току.

Рабочие характеристики привода существенно зависят от действия компенсационной обмотки и обмотки якоря, так как их амперитки при номинальной нагрузке примерно в 50...70 раз больше номинальных амперитков независимого возбуждения усилителя. Компенсационная обмотка полностью уравновешивает действие реакции якоря в том случае, если с увеличением нагрузки ток в короткозамкнутой цепи и э. д. с. на зажимах якоря не меняются, а напряжение уменьшается на величину падения напряжения в якоре и в продольных щетках. Измеряя ток в короткозамкнутой цепи или напряжение на зажимах якоря усилителя при холостом ходе и при включенном сопротивлении, можно установить сопротивление R_{wo} , шунтирующее компенсационную обмотку, которое соответствует полной компенсации. R_{wo} определяется при малом напряжении усилителя.

В случае перекомпенсации, когда $R_w > R_{wo}$, преобладает внутренняя положительная связь

по току. Электродвижущая сила усилителя от амперитков компенсационной обмотки, превышающих реакцию якоря,

$$E_k = K_k R_k (I_{wo} - I_w). \quad (7)$$

Учитывая, что

$$I_w = \frac{R_k}{R_k + R_w} I_{\partial}, \quad I_{wo} = \frac{R_k}{R_k + R_{wo}} I_{\partial},$$

имеем:

$$E_k = K_k R_k^2 \left(\frac{1}{R_k + R_{wo}} - \frac{1}{R_k + R_w} \right) I_{\partial}, \quad (8)$$

где $k_k = \frac{E_{y_n}}{R_k I_{kn}}$ — коэффициент усиления усилителя при возбуждении от компенсационной обмотки;

I_{kn} — ток компенсационной обмотки, соответствующий номинальной э. д. с.;

R_w — сопротивление, шунтирующее компенсационную обмотку при неполной компенсации;

I_w, I_{wo} — ток, протекающий по R_w, R_{wo} .

В случае недокомпенсации, когда $R_w < R_{wo}$, преобладает внутренняя отрицательная связь по току. Электродвижущая сила усилителя от некомпенсированного потока реакции якоря

$$E_{pm} = K_k R_{xy} (I_w - I_{wo}). \quad (9)$$

Подставляем значения I_w и I_{wo} :

$$E_{pm} = K_k R_{xy} R_k \left(\frac{1}{R_k + R_w} - \frac{1}{R_k + R_{wo}} \right) I_{\partial}. \quad (10)$$

По мере увеличения перекомпенсации растет склонность двигателя к колебаниям.

Если компенсационная обмотка шунтирована очень малым сопротивлением, то с увеличением нагрузки возникает сильная отрицательная связь по току, которая препятствует усилителю принять внешнюю нагрузку. Сильная недокомпенсация при $I_{\partial} < I_{\partial_0}$ вредна. Настройка компенсации должна соответствовать полной компенсации или недокомпенсации, при которой э. д. с. некомпенсированной реакции якоря (10) не превосходит $0,2 \cdot E_{y_n}$ при номинальной нагрузке. Для увеличения действия положительной связи по току можно включать обмотку положительной связи параллельно сопротивлению компенсационной обмотки (рис. 4) [Л. 2]. При этом обычно э. д. с. усилителя от обмотки управления, включенной параллельно сопротивлению компенсационной обмотки, больше э. д. с. от некомпенсированного тока реакции якоря, проходящего по сопротивлению цепи положительной связи: $k_{2c} R_k I_{\partial} > k_k R_{xy} I_2$. Это дает условие, определяющее целесообразность

включения обмотки положительной связи параллельно току компенсационной обмотке,

$$k_2 r_2 > k_x R_{xy}. \quad (11)$$

Согласно (6) и (10) э. д. с. от положительной и отрицательной связей по току (рис. 4)

$$E_{2p} = k_{2c} (R_\kappa + R_{\partial y} + R_{\partial \partial}) I_\partial - \\ - k_\kappa R_{\partial y} R_\kappa \left(\frac{1}{R_\kappa + R_\partial} - \frac{1}{R_\kappa + R_{wo}} \right) I_\partial, \quad (12)$$

где $R_3 = \frac{(r_2 + R_2)R_{uu}}{r_2 + R_2 + R_{uu}}$ — эквивалентное сопротивление, соответствующее недокомпенсации.

Преобладание положительной связи по току над приростом ампервитков отрицательной связи по напряжению и некомпенсированной реакцией якоря усилителя приводят к повышению степени неустойчивости. Необходимый запас устойчивости на малой скорости двигателя достигается гибкой обратной связью по напряжению и току, осуществляющей с помощью противоколебательного трансформатора.

Обратные отрицательные связи по току с отсечкой. В якорной цепи электропривода в переходных и установившихся режимах возникают недопустимо большие токи, что ухудшает коммутацию, сокращает срок службы главных машин и является причиной механических перенапряжений и ударов в кинематических звеньях рабочих механизмов. Автоматическое ограничение и регулирование тока и получение ограниченной механической характеристики привода достигаются применением обратной отрицательной связи по току с отсечкой. Обмотка ограничения тока включается параллельно сопротивлению дополнительных полюсов усилителя и двигателя.

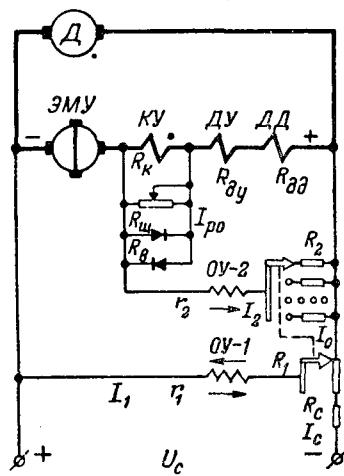


Рис. 4. Принципиальная схема электропривода широкого диапазона. Обратная отрицательная связь по току с отсечкой получена за счет некомпенсированной реакции якоря ЭМУ и нелинейных сопротивлений R_e .

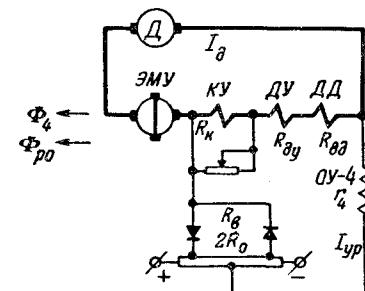


Рис. 5. Обратная отрицательная связь по току с отсечкой суммарного действия (обмотка управления $OU-4$ и обмотка якоря усилителя).

Φ_{p_0} — магнитный поток, созданный обмоткой якоря ЭМУ и током I_{yp} .

Ток в цепи обратной связи с отсечкой

$$I_4 = \frac{R_{\partial_y} + R_{\partial\partial}}{R_o + R_e + r_4 + R_{\partial y} + R_{\partial\partial}} (I_{\partial} - I_{\partial_3}). \quad (13)$$

Электродвижущая сила от отрицательной связи по току с отсечкой

$$E_4 = \frac{k_4 r_4 (R_{\partial y} + R_{\partial \partial})}{R_o + R_s + r_4 + R_{\partial y} + R_{\partial \partial}} (I_{\partial} - I_{\partial_3}), \quad (14)$$

где $k_4 = \frac{E_{yH}}{r_4 l_{yH}}$ — коэффициент усиления усилия при возбуждении от обмотки $OU-4$;

I_{∂_3} — заданный ток нагрузки, который необходимо поддерживать;

R_s — прямое сопротивление вентиляй

Ограничение и регулирование тока и ограниченную механическую характеристику привода можно получить за счет реакции якоря усилителя. Для этого достаточно шунтировать компенсационную обмотку нелинейными сопротивлениями [Л. 3], сопротивление которых падает по мере повышения приложенного к ним напряжения, например селеновыми вентилями (рис. 4). При изменении тока нагрузки в пределах $0 < I_d < I_{d3}$ через вентили ток не проходит. При токе нагрузки $I_d > I_{d3}$ вентили пропускают ток I_{po} в обход компенсационной обмотки:

$$I_{po} = \frac{R_\kappa}{R_\kappa + R_\beta} (I_\partial - I_{\partial_3}). \quad (15)$$

Ток I_{po} и обмотка якоря образуют контур обратной отрицательной связи по току с отсечкой. Электродвижущая сила усилителя от обратной связи по току с отсечкой, полученная с помощью некомпенсированной реакции якоря

$$E_{po} = \frac{k_x R_{xy} R_{\kappa}}{R_p + R_{\kappa}} (I_{\partial} - I_{\partial_3}). \quad (16)$$

Если для отсечки применяется эталонное за-
пирающее напряжение $U_s = I_{\theta_3} R_k$ (рис. 1), то

электродвижущая сила от отрицательной связи по току с отсечкой

$$E_{po} = \frac{k_x R_{xy} R_{\kappa}}{R_o + R_s + R_{\kappa}} (I_{\partial} - I_{\partial_3}). \quad (16a)$$

В режиме торможения двигателя, когда к вращающемуся якорю усилителя приложена э. д. с. двигателя такого значения, при котором собственная скорость вращения усилителя меньше скорости вращения приводного двигателя, тогда усилитель работает в режиме генератора.

Заметим попутно, что можно достичь необходимого пускового вращающего момента усилителя, если к короткозамкнутой поперечной цепи подвести напряжение внешней сети; при двойном питании якоря развивается требующийся пусковой вращающий момент усилителя.

Совместная оба способа ограничения и регулирования тока (рис. 5), согласно (14) и (16), получим э. д. с. от отрицательной связи по току с отсечкой суммарного действия (от обмотки управления и обмотки якоря):

$$E_{4p} = \frac{(k_4 r_4 + k_x R_{xy})(R_{\kappa} + R_{\partial y} + R_{\partial \partial})}{R_o + R_s + r_4 + R_{\kappa} + R_{\partial y} + R_{\partial \partial}} (I_{\partial} - I_{\partial_3}). \quad (17)$$

Одновременное действие внутренних обратных связей. Пользуясь методом наложения, определим результирующую э. д. с. усилителя как сумму э. д. с. независимого возбуждения, внутренних обратных связей и остаточного намагничивания (рис. 1):

$$E_y = E_1 - E_2 + E_3 - E_{po} \pm E_o. \quad (18)$$

При неполной компенсации усилителя в правую часть (18) необходимо добавить $+E_{\kappa}$ (8) или $-E_{pm}$ (10). Подставляя значения э. д. с. из (1), (2), (6), (16) и учитывая $E_y = U_y + RI_{\partial}$, получим:

$$\begin{aligned} n_{\partial} &= \frac{k_{1c} U_c}{(1 + k_{2c} c_e)} - \\ &- \left[\frac{R - k_{3c} (R_{\partial y} + R_{\partial \partial})}{1 + k_{2c}} + R_{xy} \right] \frac{I_{\partial}}{c_e} - \\ &- \frac{k_x R_{xy} R_{\kappa} (I_{\partial} - I_{\partial_3})}{(1 + k_{2c})(R_o + R_s + R_{\kappa}) c_e} \pm \frac{E_o}{(1 + k_{2c}) c_e}. \end{aligned} \quad (19)$$

Здесь для упрощения принято $RI_{\partial} \approx 0$ и

$$k_{3c} (R_{\partial y} + R_{\partial \partial}) I_3 \approx 0.$$

Из (19) видно, что расширение диапазона в сторону малых скоростей возможно путем усиления обратной отрицательной связи по напряжению. Увеличение k_{2c} уменьшает коэффициент усиления усилителя, вследствие чего независимое возбуждение и обратные связи по току должны быть в $(1 + k_{2c})$ раз сильнее, чем при отсутствии обратной связи по напряжению. Далее из (19) видно, что при возрастании на-

грузки падение скорости двигателя, зависящее от сопротивлений $R = R_{xy} + R_{\partial y} + R_{\kappa} + R_{\partial \partial}$, уменьшается в $(1 + k_{2c})$ раз. Также уменьшается изменение скорости двигателя от непостоянства сопротивлений R . Поэтому обратную связь по напряжению необходимо включать ближе к якорю двигателя.

Исполнительный двигатель желательно выбирать с малым сопротивлением якоря R_{xy} . Приближением места включения обратной связи по напряжению к якорю двигателя снижается прирост ампервитков отрицательной связи по напряжению с увеличением нагрузки, соответственно уменьшается глубина положительной связи по току и регулирующее действие обратной отрицательной связи по напряжению по своему характеру приближается к обратной отрицательной связи по противо-э. д. с. двигателя: $-E_{\partial} = -U_{\partial} + R_{xy} I_{\partial}$. Уменьшение влияния на скорость двигателя сопротивления якоря и нагрузки двигателя $\frac{R_{xy} I_{\partial}}{c_e}$ влечет за собой увеличение меры регулирования скорости двигателя по принципу Ползунова.

Для тока $I_{\partial} \leq I_{\partial_3}$ уравнение (19) можно переписать:

$$n_{\partial} = n_3 - n_1 \pm n_o, \quad (19a)$$

где $n_3 = \frac{k_{1c} U_c}{(1 + k_{2c}) c_e}$ — заданная скорость вращения двигателя;

$$n_1 = \left[\frac{R - k_{3c} (R_{\partial y} + R_{\partial \partial})}{1 + k_{2c}} + R_{xy} \right] \frac{I_{\partial}}{c_e} — \text{скорость, зависящая от нагрузки};$$

$n_o = \frac{E_o}{(1 + k_{2c}) c_e}$ — скорость, зависящая от остаточного намагничивания усилителя.

Относительная статическая ошибка регулирования скорости

$$s = \frac{n_3 - n_{\partial}}{n_3} = \frac{n_1}{n_3} \mp \frac{n_o}{n_3} = s_1 \mp s_o. \quad (20)$$

Условием отсутствия падения скорости вращения двигателя при возрастании нагрузки является равенство нулю в (19) коэффициента при токе двигателя

$$\frac{R - k_{3c} (R_{\partial y} + R_{\partial \partial})}{1 + k_{2c}} + R_{xy} = 0. \quad (21)$$

Относительная ошибка, зависящая от нагрузки, равна нулю ($s_1 = 0$), а результирующая относительная ошибка равна ошибке, зависящей от остаточного намагничивания $s = s_o$. Подставляя в s_o значение n_3 , n_o из (19a) и учитывая выражение для заданной скорости

двигателя n_3 , получим минимальный коэффициент усиления обратной отрицательной связи по напряжению, который необходимо иметь в электроприводе широкого диапазона с внутренними обратными связями:

$$k_{2c} = \frac{2E_o}{c_e n_{3min} s c_e} - 1. \quad (22)$$

Электродвижущая сила остаточного намагничивания $\pm E_o$ находится из характеристик холостого хода. Обычно в паспорте усилителя указывается э. д. с. E_o при отключенном независимом возбуждении. В (22) принято $\pm E_o = -2E_o$. Если выразить E_o , как часть номинальной э. д. с. усилителя $E_o = a_o E_{yn}$ и учесть, что при идеальном холостом ходе двигателя отношение номинальной э. д. с. к минимальной противо-э. д. с. двигателя равно диапазону изменения скорости $E_{yn} = DE_{3min}$, то уравнение (22) можно преобразовать:

$$k_{2c} = \frac{2a_o D}{s} - 1. \quad (22a)$$

Если действие обратной отрицательной связи по напряжению близко к обратной отрицательной связи по противо-э. д. с. двигателя, то минимальный коэффициент усиления обратной отрицательной связи можно определить из равенства

$$k_{2c} = \frac{E_o + R_{ea} I_{\partial n}}{c_e n_{3min} s c_e} - 1, \quad (23)$$

где R_{ea} — суммарное сопротивление главной цепи.

Предлагаемые формулы (22) и (23) являются основными для расчета жестких обратных связей и независимого возбуждения электропривода.

Формула (22) или (23) позволяет рассчитать коэффициент усиления k_2 при $R_2 = 0$ и выбрать обмотку для отрицательной связи по напряжению. Сопротивление в цепи обратной связи по напряжению рассчитывается так, чтобы ток в обмотке не превышал максимально допустимое значение

$$R_2 = \frac{c_e n_3 + 1,2 R_{\partial \partial} I_{\partial n}}{I_{2max}} - r_2, \quad (24)$$

где $c_e = \frac{U_{\partial n} - R_{\partial} I_{\partial n}}{n_{\partial n}}$ — коэффициент пропорциональности между скоростью и э. д. с. двигателя;

$I_{\partial n}$, $n_{\partial n}$ — номинальные ток и скорость вращения двигателя. Коэффициент 1,2 учитывает перегрузку тока.

Фактически полученный коэффициент k_{2c} должен удовлетворять (22) или (23). Такая проверка производится на минимальной скорости двигателя. Глубокую отрицательную связь по напряжению необходимо иметь и на средних скоростях двигателя.

Минимальный коэффициент усиления обратной положительной связи по току k_{3c} находится из (21):

$$k_{3c} = (1 + k_{2c}) \frac{R_{\partial \partial}}{R_{\partial y} + R_{\partial \partial}} + \frac{R}{R_{\partial y} + R_{\partial \partial}}. \quad (21a)$$

Формула (21a) позволяет рассчитать коэффициент усиления k_3 при $R_3 = 0$ и выбрать обмотку для положительной связи по току. Подставляя k_3 для выбранной обмотки, рассчитывают по (21a) сопротивление R_3 в цепи положительной связи по току.

В самовентилируемых двигателях на малой скорости ухудшается охлаждение двигателя. Увеличение сопротивления якоря $R_{\partial \partial}$ вследствие нагревания нарушает равенство (21) и уменьшает скорость вращения двигателя. Обмотку положительной связи по току необходимо включать на сопротивление дополнительных полюсов двигателя. Якорь и дополнительные полюса двигателя находятся приблизительно в равных температурных условиях и с нагреванием якоря увеличивается действие положительной связи по току и скорость вращения двигателя меняется мало. Сопротивление в цепи обмотки независимого возбуждения находится из уравнений для заданной скорости вращения двигателя (19a):

$$R_1 = \frac{k_1 r_1 U_c}{(1 + k_{2c}) c_e n_3} - r_1. \quad (25)$$

Уравнение ограниченной механической характеристики привода находится из (19) и (21) для тока $I_{\partial} > I_{\partial_3}$:

$$n_{\partial} = \frac{k_1 c_e U_c}{(1 + k_{2c}) c_e} - \frac{k_{\partial} R_{\partial y} R_{\kappa} (I_{\partial} - I_{\partial_3})}{(R_o + R_{\partial} + R_{\kappa}) (1 + k_{2c}) c_e}. \quad (26)$$

При заторможенном двигателе, когда $E_{\partial} = c_e n_{\partial} = 0$, в главной цепи протекает ток короткого замыкания

$$I_{\kappa} = I_{\partial_3} + \frac{k_1 c_e (R_o + R_{\partial} + R_{\kappa})}{k_{\partial} R_{\partial y} R_{\kappa}}. \quad (27)$$

Наибольший ток короткого замыкания получается при максимальном входном напряжении независимого возбуждения $a_1 U_c$. Для уменьшения тока короткого замыкания необходимо иметь слабую обратную отрицательную связь по напряжению на высокой скорости двигателя.

Если для ограничения и регулирования тока применяется обратная отрицательная связь по

току с отсечкой суммарного действия (обмотка якоря и обмотка управления), то уравнение ограниченной механической характеристики привода

$$n_{\partial} = \frac{k_{1c} U_c}{(1+k_{2c}) c_e} - \frac{(k_4 r_4 + k_{\alpha} R_{\alpha y})(R_{\kappa} + R_{\partial y} + R_{\partial \partial})(I_{\partial} - I_{\partial 3})}{(R_0 + R_{\alpha} + r_4 + R_{\kappa} + R_{\partial y} + R_{\partial \partial})(1+k_{2c}) c_e} \quad (28)$$

и ток короткого замыкания будет:

$$I_{\kappa} = I_{\partial 3} + \frac{k_{1c} U_c (R_0 + R_{\alpha} + r_4 + R_{\kappa} + R_{\partial y} + R_{\partial \partial})}{(k_4 r_4 + k_{\alpha} R_{\alpha y})(R_{\kappa} + R_{\partial y} + R_{\partial \partial})}. \quad (29)$$

Задавая ток короткого замыкания, по уравнению (27) или (29) рассчитывают параметры устройства ограничения тока и коэффициент усиления усилителя k_4 для обмотки ограничения тока.

Обратную отрицательную связь по напряжению и независимое возбуждение совмещают на одной обмотке управления $OY-1$ (рис. 4). Принципиальная схема упрощается на одну обмотку управления и один движок переключателя скорости. Одновременным изменением независимого возбуждения и обратной связи обеспечивается глубокая обратная связь по напряжению на малых и средних скоростях двигателя. На высокой скорости обмотка $OY-1$ загружена током меньше, чем в схеме рис. 1.

Исходные уравнения для схемы рис. 4 имеют следующий вид:

$$E_y = k_1 r_1 I_1 + [k_{2c} (R_{\kappa} + R_{\partial y} + R_{\partial \partial}) - k_{\alpha} R_{\alpha y} R_{\kappa} \left(\frac{1}{R_{\kappa} + R_{\alpha}} - \frac{1}{R_{\kappa} + R_{\alpha 0}} \right)] I_{\partial} - \frac{k_{\alpha} R_{\alpha y} R_{\kappa}}{R_{\alpha} + R_{\kappa}} (I_{\partial} - I_{\partial 3}) \mp E_0;$$

$$\left. \begin{aligned} E_y &= U_y + R I_{\partial}; \\ U_y &= c_e n_{\partial} + R_{\alpha 0} I_{\partial}; \\ U_y + U_c &= R_1 I_1 + R_c I_c; \\ U_c &= r_1 I_1 + R_c I_c; \\ I_c &= I_0 + I_1. \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

Решая совместно (30) и используя изложенную методику, можно рассчитать все параметры жестких обратных связей. Коэффициент усиления k_1 для обмотки управления $OY-1$ рассчитывается по формуле (22), сопротивление R_1 для минимальной скорости двигателя определяется по (24). Из выражения для заданной скорости двигателя n_3 определяется сопротивление R_c и проверяется, не превышает ли в режиме короткого замыкания ток в обмотке $OY-1$ максимально допустимого значения.

В заключение отметим, что низкоомные цепи обратных связей должны иметь в местах соединений электрические контакты с помощью пайки, реле и переключатели скорости должны иметь контакты с притиркой.

Вывод. В электроприводе с внутренними обратными связями можно обеспечить диапазон 100...150 изменением напряжения приложенного к якорю двигателя при относительной статической ошибке регулирования скорости 0,1...0,25. Полный диапазон с учетом изменения потока возбуждения двигателя будет 200...300. В электроприводе отсутствуют вспомогательные машины и усилители; он проще, дешевле и надежнее в эксплуатации.

Литература

1. С. А. Бахарев. Электропривод широкого диапазона изменения скорости. Станки и инструмент, № 10, 1952.
2. С. А. Бахарев, А. М. Сучилин. Электропривод. Авторское свидетельство № 95643, приоритет 8 мая 1950.
3. С. А. Бахарев. Устройство для автоматического ограничения тока в электроприводе. Авторское свидетельство № 95843, приоритет 13 мая 1950.

[22. 5. 1954]

◆ ◆ ◆

Комплексное подавление радиопомех, создаваемых электрооборудованием предприятий

Инж. Ф. Э. ИЛЬГЕКИТ и инж. О. Д. ЖОНДЕЦКАЯ
Ленинград

Предприятие как комплексный источник помех. Практика обычно использует индивидуальный метод подавления помех, когда помехи подавляются непосредственно на самом источнике. В качестве средств подавления помех в основном применяются электромагнитные экраны и высокочастотные фильтры, включаемые в электрические провода, выходящие из источника радиопомех. Практически экраном часто служит металлический корпус самого источника.

В ряде случаев применяется комплексный метод, когда несколько источников помех, конструктивно объединенных в одно целое, экранируются общим экраном, а выходящие из него провода включаются общий фильтр.

Каждое предприятие, обычно содержащее сотни и даже тысячи источников помех, можно рассматривать как единый комплексный источник радиопомех. Центральная лаборатория по борьбе с индустриальными радиопомехами разработала систему комплексного подавления радиопомех для промышленного предприятия.

Внешняя характеристика предприятия как источника помех определяется следующими факторами: 1) расположением предприятия относительно жилых зданий и удаленностью их от его границ; 2) числом воздушных выносных линий; 3) наличием интенсивных источников помех и их взаиморасположением относительно: заводского электрооборудования, окружающих жилых домов и приемных антенн (как установленных, так и возможных); 4) узловыми точками системы электроснабжения предприятия (трансформаторные подстанции, главные распределительные щиты).

В электрическом отношении комплексный источник характеризуется: 1) территориальным распределением массовых источников помех, характером создаваемых ими помех и их интенсивностью; 2) видом и числом электрических сетей.

Электросети завода бывают первичными или вторичными носителями радиопомех. Ко вторичным носителям причисляют: осветительные, радиотрансляционные, сигнализационные сети, металлические оболочки подвесных телефонных кабелей и т. п. Эта группа проводов не имеет непосредственной связи с источниками помех, но способствует распространению радиопомех, наве-

дываемых на них полем прямого излучения, источников помех или подключенных к ним электрических проводов.

Предприятия обычно снабжаются электроэнергией от специального высоковольтного подъемного кабеля, что практически исключает возможность связи антенных устройств в домах с полем помех кабеля. В противоположность кабелю воздушные выносные линии представляют значительную опасность воздействию радиопомех от завода на радиоприемные устройства, тем более, что часто эти линии проходят в непосредственной близости от наружных антенн. Это особенно важно для радиоприемных устройств, удаленных от вещательных станций. Воздушные сети, проходя вблизи трамвайных и троллейбусных контактных проводов и их оттяжек, несущих очень большие напряжения помех, являются каналами, приближающими эти помехи к жилым зданиям.

Мешающее воздействие промышленного предприятия, как и всех источников помех, характеризуется полем радиопомех за границей его территории и напряжением помех в выносных воздушных линиях. Эквивалентную схему такого комплексного источника помех представляют в виде пространственной решетки, образуемой системой помехонесущих проводов и источников радиопомех.

Элементы схемы комплексного подавления радиопомех, создаваемых электрооборудованием предприятия, должны увеличивать затухание токов высокой частоты в самой системе. Такими элементами являются групповые емкости.

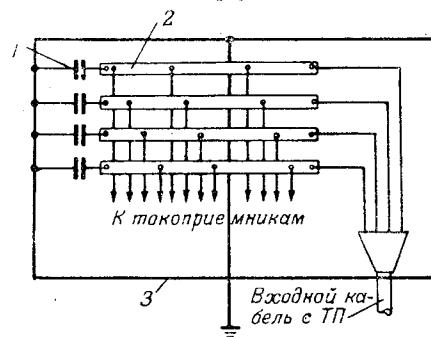


Рис. 1. Принципиальная схема групповой емкостной блокировки в силовых осветительных сетях.
1 — блокировочные конденсаторы; 2 — сборные шины; 3 — каркас.

ные фильтры в узловых точках энергосистемы предприятия, а именно на сборных шинах подстанций и цеховых сборках питающих линий.

Групповой емкостный фильтр состоит из конденсаторов типа КЗ, включаемых между токоведущей шиной электрораспределительного устройства и его заземленным каркасом (рис. 1). Число конденсаторов в таком фильтре равно числу проводов фильтруемой сети (двух-, трех- или четырехпроводной).

Конденсаторы устанавливаются емкостью $0,5 \dots 1 \text{ мкФ}$, что достаточно для подавления помех в диапазоне частот от 0,16 до $0,55 \dots 1 \text{ мГц}$. Для этого диапазона частот длина соединительных проводников не критична, однако желательно, чтобы они были по возможности короче.

Помимо увеличения общего затухания на радиочастотах в электросети, групповой емкостный фильтр уменьшает напряжение помех на зажимах источников помех, что обусловлено увеличением падения напряжения радиопомех на внутреннем сопротивлении источников за счет снижения высокочастотного сопротивления подключенной к источнику помех питающей электросети.

Мероприятия по осуществлению системы комплексного подавления радиопомех. Для уменьшения поля помех за пределами территории предприятия необходимо:

1) выделить из имеющегося на предприятии электрооборудования наиболее интенсивные источники помех, как, например, высокочастотные установки промышленного и медицинского применения, мощные искровые генераторы, электротранспорт с контактной сетью и снабдить их средствами индивидуального подавления радиопомех согласно требованиям «Норм предельно допустимых индустриальных радиопомех»;

2) включить групповые емкостные фильтры в основные узлы энергосистемы — трансформаторные подстанции и цеховые сборки питающих линий;

3) уменьшить число выносных воздушных линий. Оставшиеся выносные воздушные осветительные и силовые провода заблокировать конденсаторами на землю у границы территории предприятия.

Все остальные выносные воздушные провода, к которым, в частности, относятся линии слаботочной связи, рекомендуется каблировать. При проектировании и строительстве новых предприятий не следует вообще предусматривать воздушные линии, выходящие за пределы предприятия.

Как следует из изложенного, метод комплексного подавления радиопомех технически целесообразен и экономически выгоден, как не требующий больших затрат. Подключение защитных конденсаторов к заводской электросети к тому же увеличивает $\cos \varphi$.

При установке и эксплуатации помехоподавляющих устройств необходимо строго соблюдать правила техники безопасности. Например, при подключении конденсаторов электроустрой-

ства или электросеть должны быть обесточены. При ремонте или осмотре электросетей или электроустройств с помехоподавляющими средствами необходимо прежде всего разрядить подключенные к ним конденсаторы, что осуществляется путем предварительного заземления токонесущих цепей, к которым присоединены конденсаторы.

Данные обследования радиопомех, создаваемых электрооборудованием предприятий, и их затухание. Центральная лаборатория по борьбе с индустриальными радиопомехами обследовала ряд предприятий. В процессе обследования в диапазоне $0,16 \dots 20 \text{ мГц}$ определялись значения напряжений помех в силовых питающих линиях вблизи электрораспределительных устройств (ТП и цеховые сборки) и так называемый коэффициент переноса помех из сетей в антенны.

Коэффициент переноса K_n есть отношение напряжения радиопомех U_u на зажимах источника помех к э. д. с. в антenne радиоприемника E_a . В децибелах¹

$$K_n = 20 \lg \frac{U_u}{E_a} = U_u - E_a. \quad (1)$$

Этот коэффициент характеризует затухание индустриальных радиопомех в среде, разделяющей источник помех и радиоприемное устройство.

В городах определению мешающего воздействия радиопомех от электрооборудования завода в целом на радиоприемные устройства путем прямого измерения в большинстве случаев препятствует высокий уровень посторонних помех. Поэтому в подобных случаях применяется косвенный метод, исключающий возможность ошибки измерения за счет посторонних помех.

Косвенный метод измерения мешающего воздействия индустриальных радиопомех на приемные устройства сводится к следующему:

1) измеряют напряжения помех в электросетях предприятия; 2) определяют коэффициенты переноса помех из этих сетей в антenne радиоприемного устройства, установленного за границей предприятия; 3) вычисляют остаточную э. д. с. помех, наведенную в антenne радиоприемного устройства, находящегося за пределами территории предприятия на заранее обусловленном расстоянии.

Статистические исследования показывают, что все эти величины при выражении их значений в децибелах имеют нормальные распределения, полностью характеризуемые двумя параметрами: 1) средним значением величин; 2) средним квадратичным отклонением этих величин.

Для определения этих величин был произведен ряд измерений, результаты которых, обработанные методом математической статистики, приведены в виде кривых (рис. 2, 3, 4).

При измерениях коэффициентов переноса для перекрытия общего уровня посторонних помех в городе применялся специальный генератор помех типа ИКП-4 (разработки ЦЛИР), который

¹ В статье все напряжения помех и э. д. с. также выражены в децибелах.

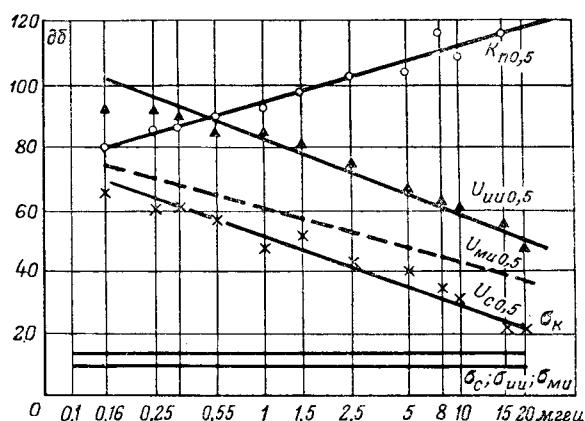


Рис. 2. Частотная характеристика параметров распределения напряжений помех и коэффициентов переноса (средние по шести заводам).

$K_{n,0,5}$ — среднее значение коэффициента переноса напряжений помех в штыревую антенну измерителя помех (усредненное для шести заводов); σ_k — среднее квадратичное отклонение значений коэффициентов переноса; $U_{u,0,5}$ — среднее значение напряжений радиопомех на зажимах электрораспределительных устройств (усредненное для трех заводов); $U_{u,0,5}$ — среднее значение напряжений помех на зажимах интенсивных источников помех; $U_{u,0,5}$ — среднее значение напряжений на зажимах коллекторных машин; σ_c , $\sigma_{u,0,5}$, $\sigma_{u,0,5}$ — средние квадратичные отклонения значений напряжений помех. Все указанные параметры представлены для значений U_u и K_n , выраженных в децибелах (для U_u над уровнем в 1 мкв).

включался в различные точки заводской электросети между проводом и землей (по несимметричному пути радиопомех). Напряжение от генератора помех на заданной частоте подавалось в заводскую электросеть, а измерители помех, установленные вне территории предприятия, фиксировали э. д. с. помех, наведенные в их штыревые антенны. Напряжение генератора помех модулировано и мощность его достаточна, чтобы отчетливо улавливать на заданной частоте измерителем помех э. д. с., наведенные в его антенне.

Таким образом, зная величину напряжения помех от генератора в электросети и уровень поля радиопомех, можно определить коэффициент переноса радиопомех для каждой данной частоты по формуле (1).

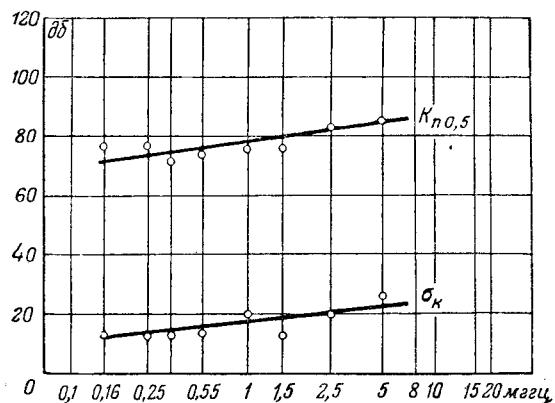


Рис. 3. Частотная характеристика параметров распределения коэффициентов переноса для завода, производственные цехи которого примыкают к жилым домам.

$K_{n,0,5}$ — средний коэффициент переноса для завода, граничащего непосредственно с жилыми домами; σ_k — среднее квадратичное отклонение значений K_n .

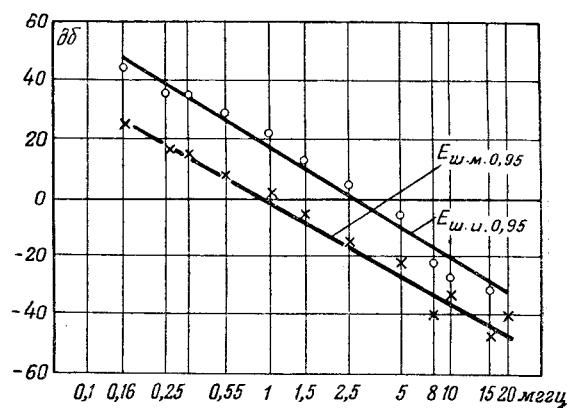


Рис. 4. Частотные характеристики «практически максимальных» помех в штыревой антенне (в децибелах над уровнем в 1 мкв).

$E_{u,0,95}$ — для интенсивных источников помех; $E_{u,0,95}$ — для коллекторных машин.

При измерениях коэффициентов переноса измерители помех устанавливались как на внешних границах территории предприятия, так и в различно удаленных от него ближайших жилых помещениях. Производственные помещения обследованной группы из шести заводов были отделены от жилых домов либо шириной улиц, либо частью территории предприятия, причем вблизи границы этой территории отсутствовали интенсивные источники помех.

Данные измерений напряжений радиопомех на зажимах электрораспределительных устройств и на зажимах источников помех различной интенсивности и значения коэффициентов переноса в частотном спектре 0,16 ... 20 мгц после обработки их методом математической статистики приведены на рис. 2.

Когда предприятие расположено в самом жилом массиве и в непосредственном соседстве с производственными помещениями имеются жилые здания, коэффициенты переноса получаются меньшими. В данном случае при измерении коэффициентов переноса генератор помех включался у сборок в цехах, расположенных на границе территории завода. Измерения велись измерителями помех со штыревой антенной, помещенной у границы завода со стороны включения генератора помех. Данные измерений после их обработки статистическим методом приведены на рис. 3.

Из рис. 3 следует, что для заводов, производственные цехи которых примыкают к жилым зданиям и интенсивные источники помех расположены вблизи границы территории завода, коэффициенты переноса значительно ниже, т. е. затухание среди переноса меньше, а разброс их значений больше. В этом случае требуется ставить большие групповые емкостные фильтры.

Необходимая степень подавления радиопомех. Необходимая степень подавления радиопомех от предприятия определяется сравнением помех, развиваемых в антенах его электрорадиооборудованием, с уровнем помех, допустимым для нормального радиоприема. Электродвиже-

щая сила помехи в антenne от одного определенного источника с напряжением U_u , включенного в определенную точку сети с коэффициентом переноса K_n , определяется следующим выражением:

$$E_a = U_u - K_n. \quad (2)$$

Значения коэффициентов переноса и напряжений помех, выраженные в децибелах, имеют нормальные распределения, поэтому э. д. с. помехи в антenne от источников помех предприятия (как разностная композиция двух нормальных распределений) также имеют нормальный закон распределения их значений со следующими параметрами:

среднее значение

$$E_{a,0.5} = U_{u,0.5} - K_{n,0.5}; \quad (3)$$

среднее квадратичное отклонение

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_u^2 + \sigma_n^2}. \quad (4)$$

Как показал опыт статистических исследований помех, практически необходимо считаться со значениями э. д. с. помех в антенах только для уровней вероятности их интегрального распределения $P(E_a < X) \leq 0.95$.

Эти значения принято называть практически максимальными значениями. Их величина определяется по формуле

$$E_{a,0.95} = E_{a,0.5} + 1,65 \cdot \sigma_e, \quad (5)$$

◇ ◇ ◇

где коэффициент 1,65 является аргументом интегральной функции нормального распределения, равной 0,95.

На рис. 4 приведены рассчитанные по формуле (5) частотные характеристики практически максимальных значений э. д. с. помех в штыревой антenne измерителя.

Нормы предельно допустимых индустриальных радиопомех предусматривают для промышленных предприятий остаточные помехи в типовой антenne измерителя не более 100 мкв (40 дБ) на частотах от 0,15 до 0,5 мгц. Практически максимальные значения помех для этого случая, как это видно на рис. 4, превышают допустимый уровень незначительно лишь на самых низких частотах указанного диапазона. Такое незначительное превышение допустимого уровня помех легко может быть устранено емкостной блокировкой только сборных шин подстанций и сборок, питающих высокочастотные установки промышленного и медицинского применения и им подобные.

В заключение следует отметить, что кажущаяся излишней эффективность системы помехоподавления в действительности вполне оправдана. Во-первых, количество обследованных предприятий еще недостаточно и в других случаях запас эффективности может быть ниже; во-вторых, еще не дан анализ и недостаточно изучено одновременное воздействие большого количества источников радиопомех, что также может потребовать системы помехоподавления более высокой эффективности.

[6. 5. 1954]

Аналитический метод расчета несимметричных режимов трехфазных дуговых электропечей

Кандидат техн. наук, доц. Н. А. МАРКОВ

Куйбышевский индустриальный институт им. Куйбышева

Работа трехфазных дуговых электросталеплавильных печей происходит с резкими и частыми изменениями нагрузки отдельных фаз печи: от обрыва до короткого замыкания дуги. В основном дуговая печь работает в несимметричном режиме.

Во многих установках трехфазных дуговых печей провода отдельных фаз подводящей сети имеют разные активные и индуктивные сопротивления, что усложняет несимметричные режимы печи.

Расчеты несимметричных режимов трехфазных дуговых электропечей представляют поэтому большой практический интерес. Такие расчеты необходимы, например, при исследовании автоматического регулирования мощности трехфазных дуговых электропечей.

Предлагается аналитический метод расчета электрических режимов дуговых печей с неравными по фазам сопротивлениями подводящей сети при неравных токах и напряжениях дуг.

Для расчета несимметричных трехфазных цепей, содержащих мощные электрические дуги, были предложены графоаналитические методы [Л.1,2]. В настоящей работе излагается аналитический метод расчета. Метод применим при неравных сопротивлениях фаз и синусоидальных несимметричных токах.

В статье рассматриваются следующие частные случаи.

1. Заданы неравные сопротивления отдельных фаз, определяются токи.

2. Определяются токи отдельных фаз печи при эксплуатационных коротких замыканиях дуг двух или одной фазы печи и при известных значениях напряжений на дугах остальных фаз.

3. Заданы равные и постоянные по величине

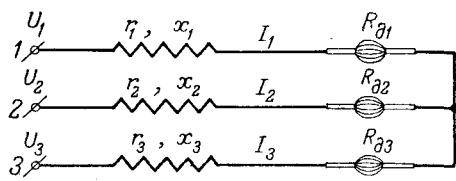


Рис. 1. Схема замещения электрической цепи трехфазной дуговой электропечи.

напряжения дуг двух фаз печи и ток одной из фаз печи, определяются напряжение на дуге третьей фазы и токи двух фаз печи.

Для схемы замещения электрической цепи трехфазной дуговой электрической печи (рис. 1) могут быть написаны следующие уравнения:

$$\left. \begin{array}{l} \dot{U}_1 + \dot{I}_1 Z_1 - \dot{I}_2 Z_2 - \dot{U}_2 = 0; \\ \dot{U}_2 + \dot{I}_2 Z_2 - \dot{I}_3 Z_3 - \dot{U}_3 = 0; \\ \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 0, \end{array} \right\} \quad (1)$$

где Z_1, Z_2, Z_3 — полные, включая сопротивления дуг, сопротивления отдельных фаз цепи;

U_1, U_2, U_3 — фазные напряжения сети.

Решение уравнений (1) дает следующие комплексные выражения токов отдельных фаз цепи:

$$\left. \begin{array}{l} \dot{I}_1 = - \frac{\dot{U}_1(2Z_2 + Z_3) + \dot{U}_2(Z_2 - Z_3)}{Z_1Z_2 + Z_2Z_3 + Z_1Z_3}; \\ \dot{I}_2 = - \frac{\dot{U}_1(Z_1 - Z_3) + \dot{U}_2(2Z_1 + Z_2)}{Z_1Z_2 + Z_2Z_3 + Z_1Z_3}; \\ \dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_1(Z_1 + 2Z_2) + \dot{U}_2(2Z_1 + Z_2)}{Z_1Z_2 + Z_2Z_3 + Z_1Z_3}. \end{array} \right\} \quad (2)$$

Если в этих выражениях заменить полные сопротивления отдельных фаз через активные и индуктивные сопротивления, а напряжение второй фазы сети через напряжение первой фазы и перейти к числовым значениям токов и напряжений, то можно получить следующие алгебраические уравнения:

$$I_1 = U_1 \sqrt{\frac{z_1'^2 + z_1''^2}{z_c'^2 + z_c''^2}}; \quad (3')$$

$$I_2 = U_1 \sqrt{\frac{z_2'^2 + z_2''^2}{z_c'^2 + z_c''^2}}; \quad (3'')$$

$$I_3 = U_1 \sqrt{\frac{z_3'^2 + z_3''^2}{z_c'^2 + z_c''^2}}, \quad (3''')$$

где $z_1' = \frac{3}{2}R_2 + \frac{3}{2}R_3 + \frac{\sqrt{3}}{2}x_2 - \frac{\sqrt{3}}{2}x_3$;

$$z_1'' = \frac{\sqrt{3}}{2}R_3 - \frac{\sqrt{3}}{2}R_2 + \frac{3}{2}x_2 + \frac{3}{2}x_3;$$

$$z_2' = -\frac{3}{2}R_3 + \sqrt{3}x_1 + \frac{\sqrt{3}}{2}x_3;$$

$$z_2'' = \sqrt{3}R_1 + \frac{\sqrt{3}}{2}R_3 + \frac{3}{2}x_3;$$

$$z_3' = \frac{3}{2}R_2 + \sqrt{3}x_1 + \frac{\sqrt{3}}{2}x_2,$$

$$z_3'' = -\sqrt{3}R_1 - \frac{\sqrt{3}}{2}R_2 + \frac{3}{2}x_2;$$

$$z_c' = R_1(R_2 + R_3) + R_2R_3 - x_1(x_2 + x_3) - x_2x_3,$$

$$z_c'' = R_1(x_2 + x_3) + R_2(x_1 + x_3) + R_3(x_1 + x_2).$$

В этих выражениях

$$R_1 = r_1 + R_{\partial 1};$$

$$R_2 = r_2 + R_{\partial 2};$$

$$R_3 = r_3 + R_{\partial 3},$$

где r_1, r_2, r_3 — активные сопротивления отдельных фаз подводящей сети;

$R_{\partial 1}, R_{\partial 2}, R_{\partial 3}$ — сопротивления дуг;

x_1, x_2, x_3 — индуктивные сопротивления отдельных фаз подводящей сети.

Уравнения (3) дают общую зависимость между токами и сопротивлениями трех фаз печи при симметричных напряжениях сети.

По заданным сопротивлениям дуг можно по уравнениям (3) непосредственно рассчитать токи.

Наибольший практический интерес представляет расчет токов по заданным напряжениям на дугах. Этот случай расчета находит применение при анализе работы автоматических регуляторов, когда в результате возникшего возмущения изменяется длина дуги в одной или двух фазах печи.

В этом случае для расчета режима уравнения (3) приводятся к следующему виду:

$$R_1 - r_1 = \beta_1 \sqrt{\frac{z_c'^2 + z_c''^2}{z_1'^2 + z_1''^2}}; \quad (4')$$

$$R_2 - r_2 = \beta_2 \sqrt{\frac{z_c'^2 + z_c''^2}{z_2'^2 + z_2''^2}}; \quad (4'')$$

$$R_3 - r_3 = \beta_3 \sqrt{\frac{z_c'^2 + z_c''^2}{z_3'^2 + z_3''^2}}, \quad (4''')$$

где $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ — отношения напряжений на дугах отдельных фаз цепи к фазному напряжению сети.

Если определить из этих уравнений активные сопротивления отдельных фаз цепи, то токи могут быть рассчитаны по формулам

$$I_1 = \frac{U_{\partial 1}}{R_1 - r_1}; \quad (5')$$

$$I_2 = \frac{U_{\partial 2}}{R_2 - r_2}, \quad (5'')$$

$$I_3 = \frac{U_{\partial 3}}{R_3 - r_3}. \quad (5''')$$

По уравнениям (4) можно выполнять расчеты токов при эксплуатационных коротких замыканиях печи. Для расчета токов при корот-

ком замыкании дуг двух фаз необходимо решить только одно из уравнений (4), так как напряжения на дугах короткозамкнутых фаз будут равны нулю. Например, в случае короткого замыкания дуг первой и второй фаз печи приходится решать уравнение (4''), которое после преобразований приводится к квадратному. Решая его, определяем R_3 :

$$R_3 = \frac{B_1 + \sqrt{B_1^2 - A_1 C_1}}{A_1}, \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} A_1 &= z_3^2 + z_3''^2 - \beta_3^2 [(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2]; \\ B_1 &= r_3(z_3^2 + z_3''^2) + \beta_3^2 [(r_1 + r_2) \times \\ &\times (r_1 r_2 - x_1 x_2 - x_2 x_3 - x_1 x_3) + (x_1 + x_2) \times \\ &\times (r_1 x_2 + r_1 x_3 + r_2 x_3 + r_2 x_1)]; \\ C_1 &= r_3^2 (z_3^2 + z_3''^2) - \beta_3^2 \times \\ &\times [(r_1 r_2 - x_1 x_2 - x_2 x_3 - x_1 x_3)^2 + \\ &+ (r_1 x_2 + r_1 x_3 + r_2 x_3 + r_2 x_1)^2]. \end{aligned}$$

Так как сопротивления дуг первой и второй фаз равны нулю, то в этих выражениях следует принять $R_1 = r_1$, $R_2 = r_2$.

Зная R_3 , можно рассчитать токи первой и второй короткозамкнутых фаз печи по уравнениям (3'), (3''), а ток третьей фазы—по формуле (5'').

Если подводящая сеть симметрична, то для определения сопротивления третьей фазы цепи и токов отдельных фаз цепи служат формулы

$$R_3 = r \frac{9 + 2\beta_3^2 + 3\beta_3 \sqrt{9 + \gamma^2(9 - 4\beta_3^2)}}{9 - 4\beta_3^2};$$

$$I_3 = \frac{U}{3r} \cdot \frac{9 - 4\beta_3^2}{2\beta_3 + \sqrt{9 + \gamma^2(9 - 4\beta_3^2)}}, \quad (7)$$

$$I_{1k3} = U \sqrt{\frac{\left(\frac{3}{2}r + \frac{3}{2}R_3\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}R_3 - \frac{\sqrt{3}}{2}r + 3x\right)^2}{(r^2 + 2rR_3 - 3x^2)^2 + 4x^2(2r + R_3)^2}},$$

$$I_{2k3} = U \sqrt{\frac{\left(-\frac{3}{2}R_3 + 2.6x\right)^2 + \left(\sqrt{3}r - \frac{\sqrt{3}}{2}R_3 + \frac{3}{2}x\right)^2}{(r^2 + 2rR_3 - 3x^2)^2 + 4x^2(2r + R_3)^2}},$$

$$\text{где } \gamma = \frac{x}{r}, r = r_1 = r_2 = r_3.$$

Для расчета токов при эксплуатационном коротком замыкании дуги одной фазы необходимо решить два уравнения.

При коротком замыкании, например, дуги первой фазы эти уравнения после преобразования будут иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} &A_2 R_2^2 R_3^2 + B_2 R_2^2 R_3 + C_2 R_2 R_3^2 + D_2 R_2^2 + \\ &+ E_2 R_3^2 + F_2 R_2 R_3 + G_2 R_2 + \\ &+ H_2 R_3 + K_2 = 0; \\ &A_3 R_2^2 R_3^2 + B_3 R_2^2 R_3 + C_3 R_2 R_3^2 + D_3 R_2^2 + \\ &+ E_3 R_3^2 + F_3 R_2 R_3 + G_3 R_2 + \\ &+ H_3 R_3 + K_3 = 0. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Значения коэффициентов в уравнениях даны в приложении 1. Уравнения (8) можно решить графически, построением двух кривых.

Если порядок сопротивлений R_2 и R_3 известен, что при выполнении таких расчетов имеет место почти всегда, то для нахождения приближенных корней уравнений (4''), (4'') можно снизить степень уравнений, применив формулу

$$\sqrt{M^2 + N^2} = 0.96 \cdot M + 0.4 \cdot N \text{ (при } M > N). \quad (9)$$

Если, например,

$$z_2'' > z_2', z_3' > z_3'', z_c'' > z_c', \quad (10)$$

то уравнения (4''), (4'') могут быть написаны в виде:

$$\left. \begin{aligned} &(R_2 - r_2)(0.96z_2'' + 0.4z_2') = \\ &= \beta_2(0.96z_c'' + 0.4z_c'); \\ &(R_3 - r_3)(0.96z_3' + 0.4z_3'') = \\ &= \beta_3(0.96z_c'' + 0.4z_c') \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

и приведены к системе квадратных уравнений

$$\left. \begin{aligned} &A_4 R_2 R_3 + B_4 R_2 + C_4 R_3 + D_4 = 0; \\ &A_5 R_2 R_3 + B_5 R_2 + C_5 R_3 + D_5 = 0. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Значения коэффициентов даны в приложении 2.

При обратном знаке какого-либо из неравенств (10) в уравнениях (11) следует поменять местами коэффициенты 0,96 и 0,4 у соответствующих величин.

В зависимости от знаков любого из неравенств (10) коэффициенты в уравнениях будут разными, поэтому уравнения (11) удобнее сразу составлять с числовыми коэффициентами и, преобразовав их, привести к уравнениям (12).

Решая систему уравнений (12), получаем значения сопротивлений R_2 и R_3 . При известных R_2 и R_3 величин фазные токи I_2 и I_3 рассчитываются по формулам (5''), (5''), а фазный ток I_1 —по формуле (3').

Для случая симметричной подводящей сети ток в короткозамкнутой фазе (I_1) определяется по формуле

$$I_{1k3} = U \sqrt{\frac{\left(\frac{3}{2}R_2 + \frac{3}{2}R_3\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}R_3 - \frac{\sqrt{3}}{2}R_2 + 3x\right)^2}{[(R_2 + R_3)r + R_2 R_3 - 3x^2]^2 + 4x^2(r + R_2 + R_3)^2}}. \quad (13)$$

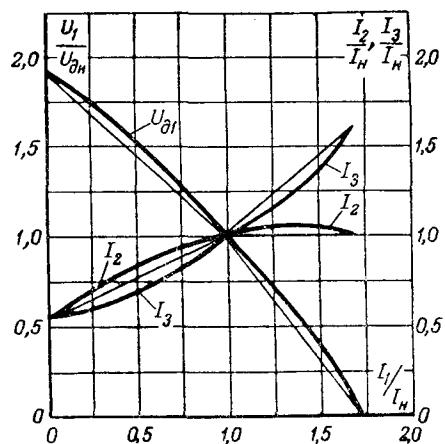


Рис. 2. Напряжение на дуге и фазные токи в зависимости от тока одной из фаз.

Проверку и уточнение полученных результатов расчетов можно выполнить подстановкой их в основные уравнения (4).

Для расчета фазных токов в общем случае несимметрии цепи необходимо решить систему всех трех уравнений (4). Для определения приближенных значений фазных токов в этом случае могут быть применены формулы, выведенные на основании кривых, представляющих зависимости напряжений на дугах и токов отдельных фаз от тока одной из фаз. Такие кривые для случая постоянства и равенства напряжений на дугах второй и третьей фаз представлены на рис. 2. Если заменить каждую из этих кривых двумя прямыми линиями, то можно написать следующие приближенные формулы для определения фазных токов и напряжений на дугах:

$$\left. \begin{aligned} U_{01x} &= \frac{3}{2}U - \frac{\frac{3}{2}U - U_{0n}}{I_n} \cdot I_{1x}; \\ I_{2x} &= I_{3x} = I_{206p1} + \frac{I_n - I_{206p1}}{I_n} \cdot I_{1x}; \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} U_{01x} &= U_{0n} - \frac{U_{0n}}{I_{k31} - I_n} \cdot (I_{1x} - I_n); \\ I_{2x} &= I_n + \frac{I_{2k31} - I_n}{I_{k31} - I_n} \cdot (I_{1x} - I_n); \\ I_{3x} &= I_n + \frac{I_{3k31} - I_n}{I_{k31} - I_n} \cdot (I_{1x} - I_n). \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Формулы (14) дают значения определяемых токов и напряжений на дугах при изменении тока первой фазы от нуля до номинального значения, а формулы (15) — при изменениях от номинального значения до тока короткого замыкания.

Ток короткого замыкания дуги первой фазы I_{k31} и токи второй и третьей фаз при коротком замыкании дуги первой фазы (I_{2k31} , I_{3k31}) определяются, как указано выше.

Ток второй фазы при обрыве дуги первой фазы может быть определен по формуле

$$I_{206p1} = 2 \frac{-U_0(r_1 + r_2) + \sqrt{U_0^2(r_1 + r_2)^2 - [(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2](U_0^2 - \frac{U^2}{4})}}{(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2} \quad (16)$$

Определив значения сопротивлений отдельных фаз цепи и подставив эти значения в уравнения (4), можно проверить и уточнить результаты расчетов.

Решение уравнений (3) для расчета двухфазных коротких замыканий дуг выполняется аналитически, а для расчета однофазного — графически, точность вычисления корней получается вполне достаточной. Расчеты в общем случае несимметрии проверяются подстановкой в уравнения (4) и могут быть выполнены также достаточно точно.

Погрешность при вычислении по формуле (9) составляет не более 4% [Л. 3], а при решении уравнений с применением этой формулы погрешность определения корней не превысит 8%. Как показал ряд выполненных расчетов, погрешность при вычисленных по приближенным формулам (14), (15) составляет 6...8%.

Выводы. Предлагаемый аналитический метод позволяет выполнять инженерные расчеты режимов трехфазных дуговых электропечей при неравных сопротивлениях фаз и синусоидальных несимметричных токах. Использование методики расчета токов при эксплуатационных коротких замыканиях позволит уточнить условия выбора электрооборудования и релейной защиты трехфазных печей.

Приложение 1. Коэффициенты в уравнениях (8):

$$\begin{aligned} A_2 &= 3 - \beta_2^2, \quad B_2 = 3(-\sqrt{3}x_1 + r_1) - 2r_1\beta_2, \\ C_2 &= -2(3r_2 + \beta_2^2r_1); \\ D_2 &= 3(x_1^2 + x_3^2 + x_1x_3 + r_1^2 + \sqrt{3}r_1x_3) - \\ &\quad - \beta_2^2[r_1^2 + (x_1 + x_3)^2]; \\ E_2 &= 3r_2^2 - \beta_2^2[r_1^2 + (x_1 + x_2)^2]; \\ F_2 &= -6r_2(-\sqrt{3}x_1 + r_1) - 2\beta_2^2[r_1^2 - x_1x_2 - x_2x_3 - \\ &\quad - x_1x_3 + (x_1 + x_3)(x_1 + x_2)]; \\ G_2 &= -6r_2(x_1^2 + x_3^2 + x_1x_3 + r_1^2 + \sqrt{3}r_1x_3) + \\ &\quad + 2\beta_2^2r_1[x_1x_2 + x_2x_3 + x_1x_3 - (x_2 + x_3)(x_1 + x_3)]; \\ H_2 &= 3r_2^2(-\sqrt{3}x_1 + r_1) + 2\beta_2^2r_1[x_1x_2 + x_2x_3 + \\ &\quad + x_1x_3 - (x_2 + x_3)(x_1 + x_2)]; \\ K_2 &= 3r_2^2(x_1^2 + x_3^2 + x_1x_3 + r_1^2 + \sqrt{3}r_1x_3) - \\ &\quad - \beta_2^2[(x_1x_2 + x_2x_3 + x_1x_3)^2 + r_1^2(x_2 + x_3)^2]; \\ A_3 &= 3 - \beta_3^2; \quad B_3 = -2(3r_3 + r_1\beta_3^2); \\ C_3 &= 3(\sqrt{3}x_1 + r_1) - 2\beta_3^2r_1; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 D_3 &= 3r_3^2 - \beta_3^2[r_1^2 + (x_1 + x_3)^2]; \\
 E_3 &= 3(x_1^2 + x_2^2 + x_1x_2 + r_1^2 - \sqrt{3}r_1x_2) - \\
 &\quad - \beta_3^2[r_1^2 + (x_1 + x_2)^2]; \\
 F_3 &= 6r_3(\sqrt{3}x_1 + r_1) - 2\beta_3^2[r_1^2 - x_1x_2 - x_2x_3 - x_1x_3 + \\
 &\quad + (x_1 + x_3)(x_1 + x_2)], \\
 G_3 &= 3r_3^2(\sqrt{3}x_1 + r_1) + 2\beta_3^2r_1[x_1x_2 + x_2x_3 + x_1x_3 + \\
 &\quad + (x_2 + x_3)(x_1 + x_3)]; \\
 H_3 &= -6r_3(x_1^2 + x_2^2 + x_1x_2 + r_1^2 - \sqrt{3}r_1x_2) + \\
 &\quad + 2\beta_3^2r_1[x_1x_2 + x_2x_3 + x_1x_3 + (x_2 + x_3)(x_1 + x_2)]; \\
 K_3 &= 3r_3^2(x_1^2 + x_2^2 + x_1x_2 + r_1^2 - \sqrt{3}r_1x_2) - \\
 &\quad - \beta_3^2[(x_1x_2 + x_2x_3 + x_1x_3)^2 + r_1^2(x_2 + x_3)^2].
 \end{aligned}$$

Приложение 2. Коэффициенты в уравнении я (12):

$$\begin{aligned}
 A_4 &= 0,23 - 0,4\beta_2; \\
 B_4 &= 1,66r_1 + 1,44x_2 + 0,69x_1 + 0,4x_3 - \\
 &\quad - 0,96\beta_2(x_1 + x_3) - 0,4\beta_2r_1; \\
 C_4 &= -0,27r_2 - 0,96\beta_2(x_1 + x_2) - 0,4\beta_2r_1; \\
 D_4 &= -1,66r_1r_2 - 1,85r_2x_3 - 0,69x_1r_2 - 0,96\beta_2r_1(x_2 + x_3) + \\
 &\quad + 0,4\beta_2x_1(x_2 + x_3) + 0,4\beta_2x_2x_3; \\
 A_5 &= 1,09 - 0,4\beta_3; \\
 B_5 &= 1,79r_3 - 0,96\beta_3(x_1 + x_3) - 0,4\beta_3r_1; \\
 C_5 &= 1,66x_1 + 0,83x_2 - 0,69r_1 + 0,6x_2 - \\
 &\quad - 0,96\beta_3(x_1 + x_2) - 0,4\beta_3r_1; \\
 D_5 &= -1,66x_1r_3 - 1,43x_2r_3 + 0,69r_1r_3 - 0,96\beta_3r_1(x_2 + x_3) + \\
 &\quad + 0,4\beta_3x_1(x_2 + x_3) + 0,4\beta_3x_2x_3.
 \end{aligned}$$

Приложение 3. Примеры расчетов несимметричных режимов трехфазной дуговой электропечи мощностью 1000 кВт, $U = 200/115$ в, $I_n = 2600$ а, $U_{\partial n} = 90$ в, $r_1 = 5 \cdot 10^{-3}$ см, $r_2 = 4 \cdot 10^{-3}$ ом, $r_3 = 6 \cdot 10^{-3}$ см, $x_1 = 22 \cdot 10^{-3}$ см, $x_2 = 14 \times 10^{-3}$ см, $x_3 = 24 \cdot 10^{-3}$ см.

Расчет токов при эксплуатационном коротком замыкании дуги одной фазы печи. Применяем для расчета уравнения (8), коэффициенты в которых вычислены по формулам приложения I:

$$\begin{aligned}
 &(2,39R_3^2 - 105,1 \cdot 10^{-3}R_3 + 4154 \cdot 10^{-6})R_2^2 + \\
 &+ (-30,1 \cdot 10^{-3}R_3^2 + 172 \cdot 10^{-6}R_3 - 47190 \cdot 10^{-9})R_2 + \\
 &+ (-758 \cdot 10^{-6}R_3^2 - 2780 \cdot 10^{-9}R_3 - 772300 \cdot 10^{-12}) = 0; \quad (8')
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &(2,39R_2^2 + 122,9 \cdot 10^{-3}R_2 + 1870 \cdot 10^{-6})R_3^2 + \\
 &+ (-42,1 \cdot 10^{-3}R_2^2 - 2168 \cdot 10^{-6}R_2 - 33296 \cdot 10^{-9})R_3 + \\
 &+ (-1198 \cdot 10^{-6}R_2^2 + 1130 \cdot 10^{-9}R_2 - 763160 \cdot 10^{-12}) = 0. \quad (8'')
 \end{aligned}$$

Решая графически эти уравнения (рис. 3), получаем:

$$R_2 = 34,27 \cdot 10^{-3}$$
 см;

$$R_3 = 26,73 \cdot 10^{-3}$$
 ом;

$$I_2 = \frac{90}{(34,27 - 4) \cdot 10^{-3}} = 2970 \text{ а};$$

$$I_3 = \frac{90}{(26,73 - 6) \cdot 10^{-3}} = 4340 \text{ а};$$

$$I_{1\text{кз}} = 115 \sqrt{\frac{[(1,5 \cdot 34,27 + 1,5 \cdot 26,73 - 0,866 \cdot 10)^2 + (-0,866 \cdot 7,51 + 1,5 \cdot 38)^2] \cdot 10^{-6}}{[(5 \cdot 61,05 + 34,27 \cdot 26,73 - 1172)^2 + (5 \cdot 38 + 34,27 \cdot 46 + 26,73 \cdot 36)^2] \cdot 10^{-12}}} = 4090 \text{ а.}$$

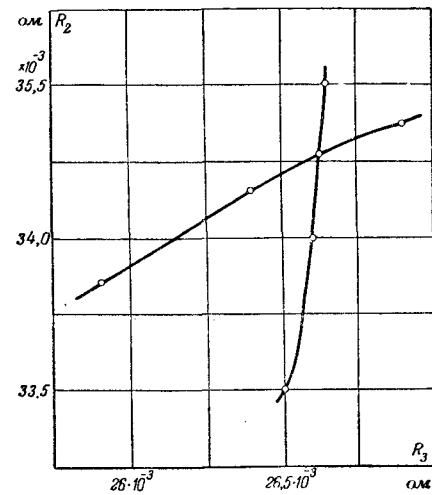


Рис. 3. Расчетные кривые к примеру.

Применим для расчета токов однофазного замыкания дуги решение уравнений (4''), (4'') с помощью формулы (9):

$$\begin{aligned}
 &(R_2 - 4 \cdot 10^{-3})[0,96(0,866R_3 + 44,63 \cdot 10^{-3}) + \\
 &+ 0,4(-1,5R_3 + 58,8 \cdot 10^{-3})] = 0,783[0,96(190 \cdot 10^{-6} + \\
 &+ 46 \cdot 10^{-3}R_2 + 36 \cdot 10^{-3}R_3) - 0,4(5 \cdot 10^{-3}R_2 + \\
 &+ 5 \cdot 10^{-3}R_3 + R_2R_3 - 1172 \cdot 10^{-6}]; \quad (4'') \\
 &(R_3 - 6 \cdot 10^{-3})[0,96(1,5R_2 + 50,1 \cdot 10^{-3}) - 0,4(-0,866R_2 + \\
 &+ 12,4 \cdot 10^{-3})] = 0,783[0,96(190 \cdot 10^{-6} + 46 \cdot 10^{-3}R_2 + \\
 &+ 36 \cdot 10^{-3}R_3) - 0,4(5 \cdot 10^{-3}R_2 + 5 \cdot 10^{-3}R_3 + R_2R_3 - \\
 &+ 1172 \cdot 10^{-6})]; \quad (4'')
 \end{aligned}$$

$$R_2 = 31,45 \cdot 10^{-3} \text{ ом};$$

$$R_3 = 25,6 \cdot 10^{-3} \text{ ом.}$$

Погрешности при расчете токов с применением формулы (9) по сравнению с графическим решением составляют для R_2 : -7,9% для R_3 : -4,2%.

Литература

1. С. И. Тельный. Автоматическое регулирование трехфазных дуговых электропечей. Электричество, стр. 53, № 5, 1946.

2. Ю. Е. Ефромович. Инженерные методы расчета режимов и определение параметров электрометаллургических печей с несимметричным подводом тока. Электричество, стр. 33, № 1, 1951.

3. Справочник машиностроителя, т. I, стр. 1036. Машгиз, 1950.

{21. 12. 1953}

Влияние состава межэлектродной среды на износ диска-катода и производительность электроискровой разрезки металлов

Кандидат техн. наук В. К. НЕВЕЖИН
НИИ МЭП СССР

Экспериментальное исследование. Электроискровая обработка металлов — весьма производительная операция. Особен-но выгоден этот способ для разрезки вязких не-ржавеющих, жаропроч-ных, твердых и термиче-ски обработанных сталей и сплавов.

Основными технико-экономическими показателями этого процесса являются износ электрода-инструмента и производительность разрезки. При постоянных электрическом режиме и материале электродов эти показатели определяются составом межэлектродной среды.

В литературе, не исключая даже работы авторов [Л. 1], дается очень упрощенное и в ряде случаев противоречащее опытным данным описание роли жидкой среды. Состояние вопроса побудило нас провести исследование влияния состава межэлектродной среды на показатели разрезки. В основном исследовались относительный износ и производительность разрезки. Относительным износом $\frac{V_k}{V_a}$ называется отношение расхода инструмента к производительности разрезки.

Принципиальная электрохинематическая схема устройства для разрезки очень проста (рис. 1). Электрод-инструмент выполняется или в виде вращающегося диска, или ленты, которой в рабочей части придается поступательное движение.

Анализ электрических процессов в межэлектродном промежутке [Л. 2] показал, что при разрезке между электродами образуется импульс-

Излагаются результаты исследования влияния состава жидкой межэлектродной среды на разрушение электродов в импульсном электрическом разряде при электроискровой разрезке металлов. Показывается, что вещества, имеющие в своем составе элементы с малой работой выхода электронов, помещенные в жидкую межэлектродную среду вызывают снижение износа электрода-катода при электроискровой разрезке металлов. Производительность электроискровой разрезки металлов зависит от физического состояния жидкой межэлектродной среды. Даются рекомендации по выбору среды для электроискровой разрезки металлов.

ный дуговой разряд продолжительностью около 10^{-2} сек. Установлено, что состав водной межэлектродной среды не оказывает заметного влияния на электрические параметры разряда. Износ электрода-инструмента определяется выделенной на нем энергией.

Известно, что на температуру катода в электрическом разряде оказывают влияние его эмиссионные свойства [Л. 3], чем меньше работа выхода электронов, тем при той же плотности тока ниже температура катода. Это явление положено нами в основу предполагаемой закономерности регулирования износа электрода-инструмента при электроискровой разрезке металла. В работе рассматривается процесс разрезки в диэлектрических жидкостях, растворах, суспензиях и коллоидах.

С целью создания наилучших условий попадания жидкости в межэлектродное пространство при исследовании разрезаемое изделие помещалось под слой жидкости. Температура жидкости поддерживалась в эксперименте в пределах $20 \dots 25^\circ\text{C}$. Напряжение холостого хода выпрямителей было 19,5 в, а рабочий ток 100 а, но в некоторых случаях ток снижался до 25 а.

Керосин, масла и вода. Разрезка в среде керосина и масел сопровождается относительным износом стального диска-катода, в 1,5 ... 2 раза большим, чем в воде. Износ диска-катода в маслах больше, чем в керосине. В воде стальной диск-катод при токе 100 а имеет относительный износ 140 %. Диски чугунные, латунные, алюминиевые и из других металлов в этих условиях изнашиваются значительно больше. Поэтому в исследованиях с водными растворами использовались стальные диски, показавшие себя наиболее стойкими.

Водные растворы. Влияние химического состава раствора на износ диска-катода изучалось в порядке расположения элементов в периодической системе. Обнаружено, что из солей элементов первой группы литиевые, натриевые и калиевые соли оказывают в водном растворе влия-

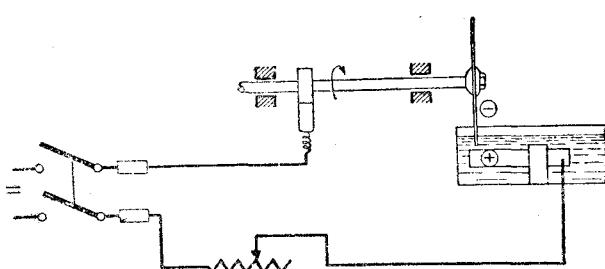


Рис. 1. Электрохинематическая схема.

ние на износ диска-катода. Закономерность снижения износа диска-катода в этих средах одинакова: при постоянном электрическом режиме с увеличением концентрации раствора уменьшается износ диска-катода. Производительность разрезки в растворах низка и не превышает при токе 100 а 2 г/мин.

Разрезка в растворах калиевых солей дает значительно больший износ диска-катода, чем в растворах натриевых солей.

Исследование разрезки в растворах кальциевых и бариевых солей показало, что по мере увеличения концентрации раствора никелевый диск-катод повышает свою стойкость, а стальной, наоборот, больше разрушается. В растворах кальциевых и бариевых солей улучшают свою стойкость по сравнению с разрезкой в воде также цинковые диски-катоды.

Проведение разрезки в растворах солей цинка и кадмия дало снижение износа диска-катода, однако лучших данных, чем в растворах натриевых солей, не получено.

Из соединений элементов третьей группы периодической системы испытаны растворы борной кислоты и сернокислого алюминия. При увеличении содержания в межэлектродной среде борной кислоты износ стального диска-катода уменьшался и в насыщенном растворе (растворимость при 20° С равна 50 г/л) был в 2 раза меньше, чем в воде. В растворе сернокислого алюминия износ диска-катода не снижается.

Из соединений элементов IV—VIII групп испытано небольшое количество растворов, так как ряд соединений этих элементов обладает малой растворимостью в воде. Большинство элементов этих групп обладает слабыми металлическими свойствами. Разрезка в растворах солей свинца, марганца, кобальта, никеля и железа не дала снижения износа диска-катода.

Растворы фосфорной, азотной, соляной и серной кислот вызывают растворение анода, что недопустимо для размежевой обработки.

Для определения влияния на показатели разрезки анионов испытанных солей была произведена разрезка в растворах уксусной, щавелевой и лимонной кислот. Эти среды на износ диска-катода влияния не оказали.

Оптимальные результаты по износу стального диска-катода при наименьшей электропроводности получены в растворе борнокислого натрия (рис. 2). При разрезке в насыщенном растворе борнокислого натрия (растворимость при 20° С равна 41 г/л) относительный износ стального диска-катода 17...18%, в 8 раз меньше, чем в воде.

Сравнение показателей относительного износа диска-катода в растворах солей с одинаковой ионной концентрацией натрия показало, что износ диска в пределах точности эксперимента был постоянен. Исключением из этой закономерности был раствор борнокислого натрия, где относительный износ диска-катода в 3 раза меньше, чем в других растворах натриевых солей с соответствующей эквивалентной концентрацией.

С целью получения более высокой концентрации натриевых солей в среде разрезки произво-

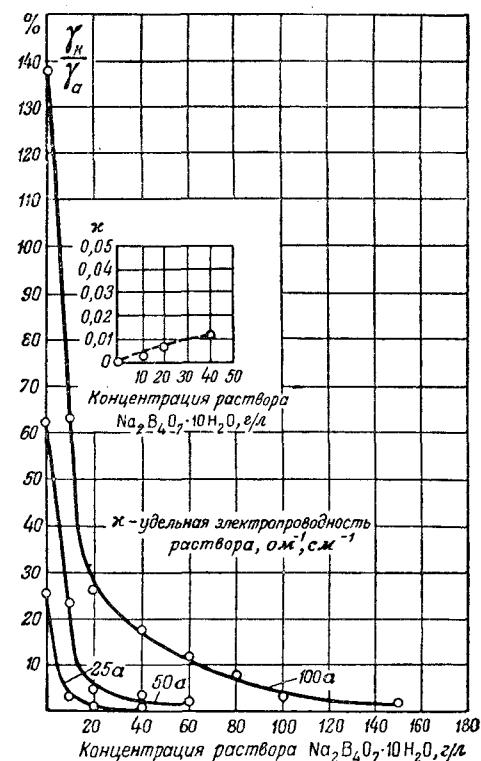


Рис. 2.

дилась в подогретом растворе однозамещенного фосфорнокислого натрия с доведением концентрации до чистого расплава (температура плавления 60° С). Из рис. 3 видно, что относительный износ диска-катода в функции концентрации минимальен (5...6%) при концентрации 500 г/л. С дальнейшим насыщением среды однозамещенным фосфорнокислым натрием относительный износ повышается и в расплаве достигает 30%.

Из большого числа испытанных двухкомпонентных растворов лучшие данные получены в растворе борнокислого натрия 40 г/л и борной кислоты 50 г/л. Наименьший относительный износ получен в трехкомпонентном растворе: буры 40 г/л, борной кислоты 50 г/л и борнокислого калия 20 г/л. В этой среде относительный износ стального диска-катода при 100 а составил 0,42% при выбросе металла из из-

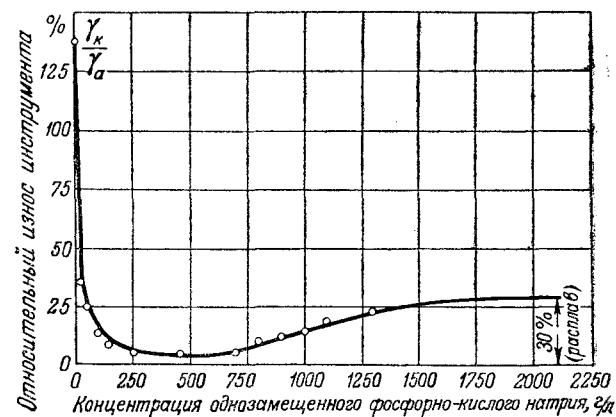


Рис. 3.

делия 1,68 г/мин; электропроводность среды 0,0079 см⁻¹ ом⁻¹. Вследствие дефицитности борно-кислого калия для практических целей целесообразно применять двухкомпонентный раствор буры и борной кислоты.

Предметом исследования также был вопрос о влиянии материала электродов на износ диска-катода в растворе буры и борной кислоты.

Анализ измерений при разрезке различными дисками-катодами (табл. 1) показал, что относительный износ не всегда определяется температурой плавления материала катода. Так, чугунные диски-катоды разрушаются в 10 раз быстрее стальных и в 3 раза быстрее медных. Графитовые диски также оказались малостойкими, хотя известно, что графитовые электроды при высокой температуре дуги разрушаются незначительно.

Относительный износ стального диска-катода зависит от температуры плавления материала анода (табл. 2). Несколько отклоняется от общей закономерности никель. Следовательно, на процесс распределения энергии между электродами оказывают влияние специфические свойства материала катода.

Эмиссионные свойства, которые определяются в значительной мере нагрев катода в разряде, главным образом зависят от процессов в поверхностном слое катода. С целью изучения явлений на поверхности диска-катода были поставлены следующие опыты: при разрезке дисками из стали и меди в межэлектродную среду кроме буры и борной кислоты добавляли соли кобальта, никеля или меди. Вводимые вещества в результате электрохимической реакции дают осаждение соответствующего металла на диске-катоде.

Как было показано выше, добавляемые вещества (уксуснокислые кобальт, никель и медь) в водном растворе не снижают износа диска-катода.

При создании на различных дисках-катодах возобновляющейся пленки одинакового металла обеспечивались постоянные условия для взаимодействия поверхности диска-катода с компонен-

Таблица 1

Анод-изделие ст. 3; $I_p = 100 \text{ а}$

Материал диска-катода	Температура плавления, °C	$\frac{\tau_K}{\tau_a} 100, \%$	$\tau_a, \text{г/мин}$
Цинк	419	810	2,0
Латунь	900	79,4	2,6
Медь	1 084	22,4	1,52
Чугун	1 200	55,7	0,79
Графит	—	64,2	0,7
Никель	1 452	8,37	1,52
Ст. 10	1 500	5,65	2,12

Таблица 2

Катод-диск ст. 10, $I_p = 100 \text{ а}$

Материал изделия	Температура плавления, °C	$\frac{\tau_K}{\tau_a} 100, \%$	$\tau_a, \text{г/мин}$
Латунь	900	2,97	3,71
Медь	1 084	4,27	2,36
Чугун	1 200	4,38	1,6
Никель	1 452	11,6	1,89
Ст. 3	1 500	5,65	2,12
Молибден	2 622	50,0	0,66
Вольфрам	2 387	332	0,36

тами среды. В результате испытаний обнаружено (табл. 3), что при осаждении на поверхности диска-катода никеля и кобальта относительный износ медного диска-катода снижался до показателей стального диска-катода, а в случае осаждения меди износ стального диска-катода увеличивался до показателей, свойственных медному диску-катоду.

Следовательно, изменение относительного износа связано с взаимодействием поверхностного слоя диска-катода с компонентами межэлектродной среды.

Таблица 3

В водной межэлектродной среде постоянно: буры 40 г/л, борной кислоты 50 г; $I_p = 75 \text{ а}$

Концентрация, г/л			Материал диска-катода	$\frac{\tau_K}{\tau_a} 100, \%$	$\tau_a, \text{г/мин}$
Co (C ₂ H ₅ O ₂) ₂ ·4H ₂ O	Ni (C ₂ H ₅ O ₂) ₂	Cu (C ₂ H ₅ O ₂) ₂ ·2H ₂ O			
—	—	—	Ст. 10 Никель Медь	3,03 4,0 11,8	1,65 1,4 1,44
10	—	—	Ст. 10 Медь	2,02 1,87	1,36 1,92
—	10	—	Ст. 10 Медь	2,03 2,36	1,12 1,26
—	—	10	Ст. 10 Медь	15,1 11,3	1,26 1,15
		10			

При мечание. Измерения скорректированы на изменение веса электродов за счет электрохимического процесса.

При изучении роли электрохимических реакций в процессе взаимодействия компонентов среды с материалом диска-катода было обнаружено, что наличие в диэлектрической среде (масле) буры и борной кислоты (во взвешенном состоянии) вызывает снижение износа диска-катода. Следовательно, снижение износа диска не является следствием электрохимических реакций в водной среде.

Водные коллоиды и суспензии. Известно, что при разрезке в натриевом жидким стекле, имеющем в своем составе в растворенном состоянии кремнекислый натрий и в коллоидальном состоянии кремниевую кислоту, производительность в несколько раз больше, чем в водных растворах.

Испытания раствора кремнекислого натрия не показали роста производительности по сравнению с разрезкой в других растворах. Поэтому предполагается, что повышение производительности разрезки в жидким стекле вызывается присутствием кремниевой кислоты в коллоидальном состоянии.

Таблица 4

Диск ст. 10; $I_p = 100$ а

Состав водного коллоида	Концентрация, г/л	$\frac{\tau_k}{\tau_a} 100$, %	τ_a , г/мин	$\tau_k + \tau_a$, г/мин
Декстрин	40	92	1,15	2,21
Декстрин	40	3,7	2,3	2,38
Бура	40	4,5	3,82	3,99
Борная кислота	50	9,26	3,74	4,03
Декстрин	200	102	1,51	3,06
Бура	40	11,7	2,96	3,31
Борная кислота	50	74,0	2,47	4,3
Казеин	50	9,28	3,77	4,12
Бура	40	5,65	2,12	2,24
Борная кислота	50			

Испытание ряда коллоидов (табл. 4): декстрин, столярного клея, казеина и др. — показало, что с увеличением концентрации коллоидов (до некоторого предела) вне зависимости от их химического состава растет производительность разрезки. Добавление в любой колloid буры и борной кислоты вызывает снижение износа диска-катода при сохранении общего выбраса металла из электродов. По сравнению с водными растворами производительность разрезки в коллоидах больше в 2..3 раза. Недостаток испытанных коллоидов — клейкость и высокая стоимость.

Результаты измерений в среде с более крупными размерами частиц, чем коллоиды, — в вод-

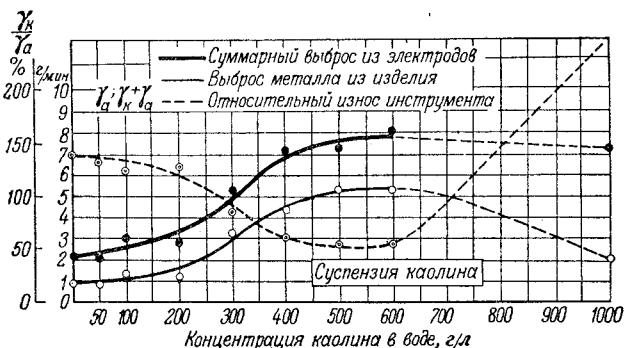


Рис. 4.

ной суспензии каолина — показали, что с повышением концентрации каолина в межэлектродной среде выброс металла с электродов увеличивается, достигая при концентрации 500 г/л своего максимального значения 7...8 г/мин. Относительный износ инструмента составляет 52...56 %. Дальнейшее повышение концентрации дает резкое повышение износа инструмента и снижение производительности разрезки. Добавление буры и борной кислоты в суспензию каолина вызывает снижение относительного износа диска до 12...15 %. Суммарный выброс металла из электродов при этом практически не меняется.

Проведение разрезки в суспензии мела дало повышение производительности обработки по мере увеличения концентрации мела. Общий выброс металла из электродов в этой среде в 2 раза меньше, чем в среде суспензии каолина. По причине значительного износа диска и низкой производительности суспензия мела для практического использования не рекомендуется.

На рис. 5 сопоставлены данные производительности разрезки и относительного износа диска, полученные в различных средах. Наибольшая производительность разрезки получается при использовании среды суспензии каолина с бурой и борной кислотой. Наименьший относительный износ диска-катода наблюдается в водных растворах, однако производительность разрезки в них значительно ниже, чем в суспензиях и коллоидах. Близкие показатели к суспензии каолина дает обработка в натриевом жидким стекле. Однако этой среде присущ ряд эксплуатационных недостатков.

Для практического использования рекомендуется применять водную межэлектродную среду состава: каолин 400...450 г/л, бура 40 г/л, борная кислота 50 г/л.

С целью повышения производительности электроискровую разрезку необходимо проводить при рабочем напряжении 24...26 в и рабочем токе 250...400 а. Жидкость в межэлектродный промежуток можно подавать поливом с интенсивностью полива 20...25 л/мин или осуществлять разрезку в ванне с жидкостью.

Анализ результатов. Обосновывая закономерность снижения износа электрода-катода изменением эмиссионных свойств, необходимо установо-

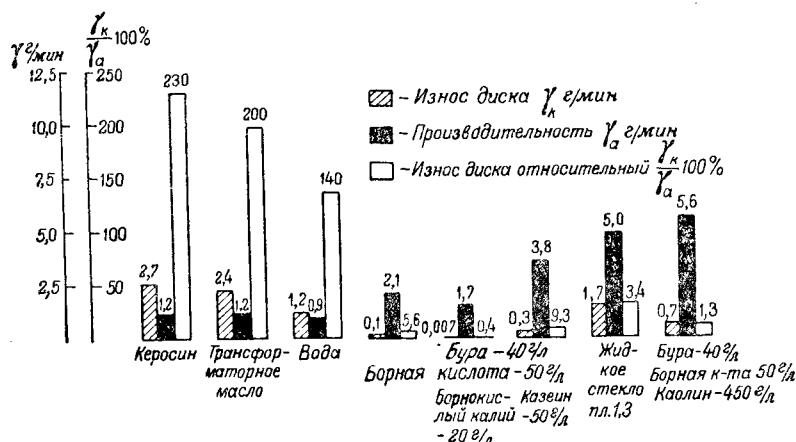


Рис. 5. Износ диска и производительность разрезки в различных средах.

вить возможность нахождения щелочного металла или его окиси на поверхности раскаленного или расплавленного катода. При этом известно, что температура плавления и испарения щелочного металла значительно ниже температуры плавления железа и меди.

В электросварке для очистки наплавленного металла от окислов в покрытие электродов добавляют химические вещества, образующие с окислами металлов легкоплавкие соединения с меньшим удельным весом, чем металл или растворяющие окислы. Связанные окислы тогда остаются на поверхности расплавленного металла. После затвердевания пленка окислов легко отделяется. Химическим анализом установлено, что в такой пленке могут содержаться в значительном количестве окислы щелочных металлов.

Переходя к процессам на электродах при электроискровой разрезке в растворах солей щелочных металлов, можно предположить следующие явления:

1. При вращении диска-катода часть жидкости захватывается диском и движется к месту образования разряда. В зоне с высокой температурой жидкость испаряется и растворенное вещество оседает на электродах, в том числе на диске-катоде.

2. Вследствие высокой температуры катодного пятна в дуговом разряде попавшие в эту зону вещества диссоциируют; соли металлов частично или полностью распадаются до окислов.

3. Окислы щелочных металлов, образовавшиеся на поверхности катода, растворяют окислы металла катода, которые всегда имеются на поверхности металла. Связанные окислы, вследствие понижения температуры плавления, плавятся и растекаются по раскаленному или расплавленному металлу катода.

Водная среда способствует окислению металла катода и потому является для этого процесса благоприятной. В расплаве соли интенсивность окисления металла значительно меньше, чем в водном растворе, и, как показало исследование, износ диска-катода в расплаве больше, чем в водном растворе.

Образовавшаяся в разряде пленка частично удаляется при выбросе металла с катода и частично разрушается в дальнейшем при взаимодействии с водой. Таким образом, при работе установки в растворе соли щелочного металла можно предполагать образование в разряде на катоде пленки из окислов щелочного металла и металла катода и последующее разрушение ее.

Наличие на поверхности катода окислов щелочных металлов, как известно, вызывает значительное снижение работы выхода и при постоянстве значения тока в разряде ведет к снижению температуры катода. Уменьшение температуры катода в разряде приводит к снижению износа диска.

При указанном механизме процесса с увеличением концентрации солей щелочных металлов износ диска-катода должен уменьшиться, что и наблюдается в действительности.

Наличие в межэлектродной среде борной кислоты и борнокислых соединений улучшает связывание окислов железа, меди и других металлов [Л. 5]. Исследование подтверждает это, показывая, что наилучший результат по снижению износа диска наблюдается при насыщении среды борнокислым натрием, калием и борной кислотой.

Наличие в растворе цинковой и кадмииевой солей вызывает осаждение цинка и кадмия на диске-катоде. Высадившийся на диске металл быстро окисляется. Окись цинка и кадмия обладает более низкой работой выхода, чем чистый цинк, кадмий и железо, что закономерно приводит к снижению износа диска. В известной мере особую группу составляют растворы солей щелочноземельных элементов. Окись бария и кальция имеет незначительную работу выхода. Как известно [Л. 4], при покрытиях из окислов щелочноземельных элементов не допускается примеси железа к металлу катода, который обычно готовится из никеля.

Нами получены аналогичные результаты: при разрезке в растворе бариевых и кальциевых солей износ никелевого диска-катода уменьшался с концентрацией растворов, в то время как стальной диск-катод разрушался при этом больше, чем в воде. При испытании растворов ряда других солей (меди, железа, никеля, кобальта, свинца и др.) снижение износа диска-катода не обнаружено. Работа выхода у металлов и окислов, входящих в состав этих соединений, не ниже, чем работа выхода у железа, следовательно, это явление закономерно.

Используя предлагаемую модель процесса, удалось объяснить полученные экспериментальные данные по влиянию состава межэлектродной среды и материала диска-катода на его износ. Таким образом, приходим к выводу, что рабочую гипотезу, по которой предполагалось существование связи эмиссионных свойств со скоростью разрушения катода, следует считать возможным

объяснением полученных экспериментальных закономерностей.

Повышение производительности разрезки не связано с химическим составом жидкой среды, а зависит от ее физического состояния. Исследованием установлено, что на производительность обработки оказывают влияние коллоидные растворы и устойчивые суспензии. Общий выброс металла из электродов повышается при обработке в данных средах по сравнению с обработкой в воде в 2...4 раза, что является, по нашим предположениям, следствием уменьшения теплопроводности среды.

Литература

1. Б. Р. и Н. И. Лазаренко. Электроискровая обработка металлов. Госэнергоиздат, 1950.
2. В. К. Невежин. Электроискровая обработка металлов при низких напряжениях. Электричество, № 11, 1951.
3. И. А. Капцов, Электрические явления в газах и вакууме. Гостехиздат, 1947.
4. Г. Герман и С. Вагнер. Оксидный катод. Гостехиздат, 1949.
5. Г. И. Погодин-Алексеев. Теория сварочных процессов. Машгиз, 1950.

[29. 6. 1953]



К выражению закона Био и Савара

Кандидат физико-матем. наук В. М. ЮЖАКОВ

Ленинградский заочный индустриальный институт

Для определения магнитного поля тока I наряду с известной формулой

$$\overline{dH} = \frac{I}{4\pi} \frac{[dl \ r]}{r^3}, \quad (1)$$

относящейся к незамкнутому линейному элементу тока, можно пользоваться также следующим выражением для напряженности магнитного поля dH плоского элементарного замкнутого контура произвольной формы (рис. 1):

$$\overline{dH} = \frac{I \ dS}{4\pi r^3} \sqrt{1 + 3 \cos^2 \alpha}, \quad (2)$$

где dS — внутренняя площадь плоскости контура; r — расстояние от контура до точки, в которой определяется напряженность (радиус-вектор); α — угол между нормалью к dS и радиусом-вектором.

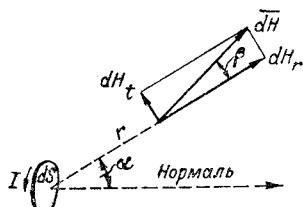


Рис.

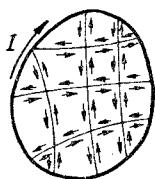


Рис. 2

Вектор \overline{dH} лежит в плоскости, проходящей через нормаль и радиус-вектор. Его составляющие определяются формулами

$$dH_r = \frac{I \ dS}{2\pi r^3} \cos \alpha; \quad dH_t = \frac{I \ dS}{4\pi r^3} \sin \alpha. \quad (3)$$

Дается математическое выражение закона Био и Савара в виде формулы, отличной от принятой. Приводятся примеры вычисления с помощью этой формулы напряженности магнитного поля тока для ряда простых случаев.

Угол β между радиусом-вектором и вектором \overline{dH} находится из формулы

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{1}{2} \operatorname{tg} \alpha. \quad (4)$$

Для вычисления напряженности магнитного поля H контур тока, создающего это поле, можно разложить на элементарные контуры. Для этого надо представить себе достаточно частую сетку (рис. 2), расположенную вдоль любой поверхности, проходящей через контур. Ее ячейки, соответствующие элементарным контурам, должны быть так малы, чтобы каждую из них можно было считать расположенной в касательной плоскости к сетке.

По каждому элементарному контуру протекает тот же ток I , что и по основному контуру. В каждом звене контуров, за исключением звеньев, совпадающих с основным контуром, протекают равные, но противоположные токи. Таким образом, разложение на элементарные контуры ничего не изменяет, но магнитное поле тока основного контура может рассматриваться как результат наложения магнитных полей токов элементарных контуров.

Этот способ позволяет без труда производить вычисления магнитных полей для ряда важнейших случаев. Ниже приводятся примеры таких вычислений.

Напряженность поля бесконечного прямолинейного тока. В этом случае сетку удобно расположить в плоскости, проходящей через бесконечный прямолинейный проводник, по которому протекает ток I , и точку O , напряженность магнитного поля в которой должна быть найдена. Эта плоскость разделяется проводником на две половины; сетку элементарных кон-

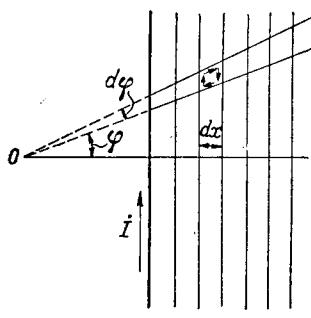


Рис. 3

туров строим в той половине, которая не за-ключает точки O . Построение сетки (рис. 3) осуществляем прямыми, параллельными току и находящимися на расстоянии dx друг от друга, а также продолжениями радиусов-векторов, выходящих из точки O . Тогда для всех элементарных контуров

$$\alpha = \frac{\pi}{2}, \sqrt{1 + 3 \cos^2 \alpha} = 1.$$

Ось x проводим из O в направлении, перпендикулярном проводнику. Площадь элементарного контура

$$dS = \frac{rd\varphi dx}{\cos\varphi},$$

где φ — полярный угол. Тогда

$$dH = \frac{I d\varphi dx}{4\pi r^2 \cos\varphi} = \frac{I \cos\varphi}{4\pi x^2} dx d\varphi, \quad (5)$$

$$H = \frac{I}{4\pi} \int_a^{\infty} \frac{dx}{x^2} \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \cos\varphi d\varphi = \frac{I}{2\pi a}, \quad (6)$$

где a — расстояние от точки O до проводника с током.

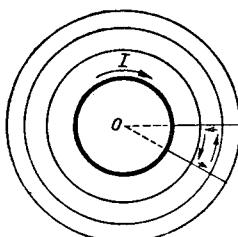


Рис. 4

Напряженность поля в центре кругового тока. Построение сетки в этом случае (рис. 4) можно осуществить во внешней части плоскости контура продолжением радиусов, выходящих из центра O , и окружностями, концентри- ческими с контуром.

Тогда, как и в предыдущем случае,

$$\alpha = \frac{\pi}{2}, \sqrt{1 + 3 \cos^2 \alpha} = 1,$$

а

$$dH = \frac{I}{4\pi} \frac{rd\varphi dr}{r^3}, \quad (7)$$

$$H = \frac{I}{2R}, \quad (8)$$

где φ — полярный угол; R — радиус контура.

Напряженность поля на оси кругового тока. Сетку можно расположить по поверхности меньшей части сферы, проходящей через контур и имеющей центр в точке O , в которой определяется напряженность. Тогда для всех элементарных контуров $\alpha = 0$ и $\sqrt{1 + 3 \cos^2 \alpha} = 2$.

Сетку можно построить (рис. 5), воспользовавшись «меридианами», плоскости которых проходят через ось кругового тока, и «параллельными

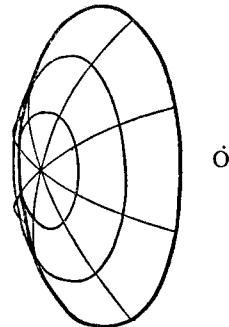


Рис. 5

«плоскостями», плоскости которых параллельны плоскости тока.

Составляющая вектора \bar{H} вдоль оси

$$dH \cos\varphi = \frac{I dS}{4\pi r^3} 2 \cos\varphi, \quad (9)$$

где φ — угол между радиусом-вектором и осью контура. Напряженность H получится в результате интегрирования выражения (9), так как интегрирование второй составляющей дает нуль:

$$H = \int_0^{\varphi_0} \frac{I}{2\pi r^3} \cos\varphi \cdot 2\pi r^2 \sin\varphi d\varphi = \frac{I}{2r} \sin^2 \varphi_0, \quad (10)$$

где φ_0 — значение φ для точек контура. Так как $\sin\varphi_0 = \frac{R}{r}$, где R — радиус контура, то

$$H = \frac{IR^2}{2r^3}.$$

Литература

Дж. А. Стрэттон. Теория электромагнетизма. ОГИЗ — Гостехиздат, 1948.

[10. 11. 1953]



Расчет кривых нагревания элементов нагружочных сопротивлений с учетом изменения их теплоотдачи и теплоемкости

Кандидат техн. наук, доц. Н. Н. СИДОРОВ

Ленинградский институт инженеров железнодорожного транспорта

При переменной нагрузке определение нагрева секций реостата, „пускового или другого типа“, удобно производить по кривым вида $\tau = f(t)$ нагревания и остыивания элементов сопротивлений при различных токах, иначе говоря по сетке кривых перегревов. Однако таких кривых перегревов для различных типов и номеров элементов сопротивлений заводы-изготовители пока не дают.

Расчет кривых нагревания по обычной формуле

$$\tau = \frac{P_o}{B - P_o \alpha} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

затрудняется тем обстоятельством, что теплоотдача B и теплоемкость C элементов зависят от их перегрева.

Анализ опытных данных установившихся режимов нагрева элементов сопротивлений показал, что теплоотдача в зоне перегревов от 0 до 500°C изменяется приблизительно по линейному закону [Л. 1].

Поэтому можно положить теплоотдачу элемента

$$B = B_0 (1 + \beta \tau) \left[\frac{\text{вт}}{\text{°C}} \right], \quad (1)$$

где B_0 — теплоотдача при температуре окружающего воздуха ($\tau = 0$); β — температурный коэффициент теплоотдачи, $\frac{1}{\text{°C}}$; τ — перегрев, °C.

Теплоемкость металлов, как известно, зависит от температуры [Л. 2]:

$$c = c_0 + a\theta + b\theta^2,$$

где θ — температура металла.

Коэффициент b обычно мал, и для технических расчетов достаточно считать теплоемкость c зависящей линейно от температуры:

$$c = c'_0 (1 + \gamma \theta), \quad (2)$$

где $\gamma' = \frac{a}{c'_0}$.

Практическая необходимость уточненного определения перегревов элементов сопротивлений нагружочных реостатов при больших кратковременных нагрузках требует учета изменения их теплоемкости с температурой. Данные общие формулы расчета кривых нагрева элементов сопротивлений с учетом изменения теплоотдачи и теплоемкости с температурой. Рассмотрены некоторые частные случаи и оценено влияние на точность расчетов пренебрежения изменением теплоемкости.

Вводя в (2) перегрев τ и обозначив температуру окружающей среды θ_s , можем написать:

$$c = c_0 (1 + \gamma \tau), \quad (3)$$

где

$$c_0 = (c'_0 + a\theta_s); \quad \gamma = \frac{a}{c'_0 + a\theta_s} = \frac{1}{\frac{1}{\gamma'} + \theta_s}. \quad (4)$$

В табл. 1 приведены средние значения c_0 и γ для некоторых металлов по данным Bystroem, Pionchon и др. [Л. 2].

Таблица 1

Металл	$\frac{c_0}{\text{вт}\cdot\text{сек}}$ $\frac{1}{\text{°C}}$	$\frac{\gamma}{\text{°C}}$
Чугун	0,502	0,00056
Сталь	0,460	0,00073
Никель	0,450	0,00043
Хром	0,420	—
Медь	0,400	0,00024

Теплоемкость C элемента сопротивления весом G

$$C = C_0 (1 + \gamma \tau), \quad (5)$$

где $C_0 = c_0 G$.

Принимая во внимание выражения (1) и (5), уравнение баланса тепла для элемента сопротивления напишем в следующем виде:

$$P_o (1 + \alpha \tau) dt = C_0 (1 + \gamma \tau) d\tau + B_o (1 + \beta \tau) \tau dt, \quad (6)$$

где $P_o = I^2 R_o$ — мощность потерь при токе нагрузки I элемента и начальном значении R_o сопротивления элемента; α — температурный коэффициент сопротивления.

Разделив переменные, сделав некоторые алгебраические преобразования, введя обозначения

$$b_1 = \frac{P_o}{B_o \beta}; \quad b_2 = \frac{B_o - P_o \alpha}{B_o \beta}; \quad b_3 = \sqrt{b_1 + \frac{b_2^2}{4}}, \quad (7)$$

и определяя постоянную интегрирования из условия $t=0$, $\tau=\tau_o$, получим:

$$t = -\frac{C_o}{2B_o\beta b_3} \ln \frac{\left(\tau + \frac{b_2}{2} - b_3\right)^\Delta \left(\tau_o + \frac{b_2}{2} + b_3\right)^{(\Delta-2)\beta b_3}}{\left(\tau_o + \frac{b_2}{2} - b_3\right)^\Delta \left(\tau + \frac{b_2}{2} + b_3\right)^{(\Delta-2)\beta b_3}}, \quad (8)$$

где

$$\Delta = 1 + \gamma \left(b_3 - \frac{b_2}{2}\right). \quad (9)$$

Положив в (8) $t=\infty$, находим:

$$\tau_\infty = b_3 - \frac{b_2}{2} = \frac{B_o - P_o \alpha}{2B_o \beta} \left(\sqrt{\frac{4P_o B_o \beta}{(B_o - P_o \alpha)}} + 1 - 1 \right). \quad (10)$$

Введем в выражения (8) и (9) t_∞ ; тогда получим удобные для расчета формулы:

$$t = \frac{C_o}{2B_o\beta b_3} \left\{ \Delta \ln \frac{\tau_\infty - \tau_o}{\tau_\infty - \tau} + (\Delta - 2\gamma b_3) \ln \frac{\tau + \tau_\infty + b_2}{\tau_o + \tau_\infty + b_2} \right\}, \quad (11)$$

$$\Delta = 1 + \gamma \tau_\infty.$$

Для случая остыивания элемента без тока необходимо положить $P_o=0$, $\tau_\infty=0$; тогда $b_1=0$; $b_2=\frac{1}{\beta}$; $b_3=\frac{1}{2\beta}$, и уравнение (11) преобразуется в следующее:

$$t = \frac{C_o}{B_o} \left\{ \ln \frac{\tau_o}{\tau} + \left(1 - \frac{1}{\beta}\right) \ln \frac{\tau \beta + 1}{\tau_o \beta + 1} \right\}. \quad (12)$$

Если считать теплоемкость элемента сопротивления постоянной величиной, не зависящей от температуры, или ввести в расчет среднее значение теплоемкости в диапазоне рассматриваемого изменения перегрева, то, полагая $\gamma=0$, из (11) получим:

$$\tau = \frac{\tau_\infty (\tau_\infty + b_2) (1 - e^{-\frac{t}{T}}) + \tau_o [\tau_\infty + (\tau_\infty + b_2) e^{-\frac{t}{T}}]}{(\tau_\infty + b_2) + \tau_\infty e^{-\frac{t}{T}} + \tau_o (1 - e^{-\frac{t}{T}})}, \quad (13)$$

где постоянная времени $T = \frac{C_o}{2B_o\beta b_3}$.

При отсутствии начального перегрева ($\tau_o=0$) уравнение (13) упрощается:

$$\tau = \frac{\tau_\infty (\tau_\infty + b_2) (1 - e^{-\frac{t}{T}})}{(\tau_\infty + b_2) + \tau_\infty e^{-\frac{t}{T}}}. \quad (14)$$

Уравнение остыивания элемента в этом случае будет иметь вид:

$$\tau = \frac{\tau_o e^{-\frac{t}{T}}}{\tau_o \beta (1 - e^{-\frac{t}{T}}) + 1}; \quad (15)$$

здесь постоянная времени $T = \frac{C_o}{B_o}$, как это также следует из (12).

Постоянные B_o и β для данного элемента сопротивления можно найти по двум известным значениям установившихся перегревов τ_∞ для двух токов.

Предположим, что для токов I и I' известны установившиеся перегревы τ_∞ и τ'_∞ а следовательно, и значения $P_o=I^2 R_o$ и $P'_o=I'^2 R_o$.

Решив уравнение (10) относительно B_o , получим:

$$B_o = \frac{P_o (\alpha \tau_\infty + 1)}{\tau_\infty (\beta \tau_\infty + 1)}. \quad (16)$$

Для режима нагрева с током I'

$$B_o = \frac{P'_o (\alpha \tau'_\infty + 1)}{\tau'_\infty (\beta \tau'_\infty + 1)}. \quad (17)$$

Исключив B_o из уравнений (16) и (17) путем деления их друг на друга и обозначив

$$P'_o \tau'_\infty (\alpha \tau'_\infty + 1) = E \quad \text{и} \quad P_o \tau_\infty (\alpha \tau_\infty + 1) = K,$$

найдем:

$$\beta = \frac{K - E}{E \tau_\infty - K \tau'_\infty}, \quad (18)$$

Далее, вычисляем B_o по формуле (16) или (17)

Таблица 2

Номер элемента	$G_o, \text{ кг}$	$R_o, \text{ ом}$	$B_o, \frac{\text{вт}}{\text{°С}}$	$\beta \cdot 10^4, \frac{1}{\text{°С}}$	$C_o, \frac{\text{вт} \cdot \text{сек}}{\text{°С}}$	$\gamma, \frac{1}{\text{°С}}$
61	1,251	0,0057	0,443	8,0	628	0,00056
62	1,080	0,0075	0,420	7,5	542	0,00056
63	1,057	0,0095	0,410	7,5	530	0,00056
64	1,000	0,0145	0,452	7,8	502	0,00056
65	0,938	0,0215	0,417	8,0	471	0,00056
66	0,855	0,0325	0,350	9,0	430	0,00056

Для примера в табл. 2 приведены результаты расчетов B_o и β для № 61...66 элементов чугунных сопротивлений типа СЖ. Расчеты произведены на основании заводских данных [Л. 3] о длительных токах элементов разных номеров при перегревах 175, 350 и 450°C. В табл. 2 B_o и β — средние из полученных по трем возможным комбинациям пар данных длительных режимов с корректировкой на режим $\tau_\infty=450$ °С. В таблице приведены также теплоемкости C_o элементов. Для чугунных сопротивлений принимается температурный коэффициент сопротивления $\alpha=7 \cdot 10^{-4}$.

Влияние изменения теплоемкости на кривую нагрева начинает заметно сказываться при сравнительно высоких перегревах. На рисунке приведены кривые нагрева для чугунного элемента сопротивления № 62 при токах 240 а (кривые 1 и 2) и 400 а (кривые 3 и 4). Кривые 1 и 3 рассчитаны по формуле (11) с учетом изменения теплоемкости, а кривые 2 и 4 — по формуле (13), считая теплоемкость величиной постоянной.

Пользуясь формулами (11) и (13) и полагая в них $\tau_o=0$, можно найти относительную ошибку

расчета времени нагрева до данного перегрева τ при пренебрежении изменением теплоемкости:

$$\Delta t = 100 \frac{t_1 - t_2}{t_2} = 100 \tau \tau_\infty \left\{ \frac{1 - \left(1 + \frac{b_2}{\tau_\infty}\right) \frac{1 \ln \frac{\tau + b_4}{b_4}}{1 \ln \frac{\tau_\infty}{\tau_\infty - \tau}}}{1 + \frac{1 \ln \frac{\tau + b_4}{b_4}}{1 \ln \frac{\tau_\infty}{\tau_\infty - \tau}}} \right\} \%. \quad (19)$$

Здесь t_1 — время достижения перегрева τ , рассчитанное по формуле (11); t_2 — то же, но рассчитанное по формуле (13); $b_4 = \tau_\infty + b_2$.

На рисунке приведены кривые $\Delta t = f(\tau)$ для случаев нагрева элемента № 62 токами 400 а (кривая 5) и 240 а (кривая 6). Как видно из этих кривых, значения Δt в пределах τ от 300 до 600°С изменяются примерно от 8 до 17%. Такого же большого значения достигает ошибка при определении перегрева за данное время нагревания элемента. Поэтому при высоких конечных перегревах, начиная примерно с 200°С, не следует пренебречь учетом изменения теплоемкости элемента сопротивления с температурой.

◆ ◆ ◆

Влияние схемы включения на световой поток люминесцентных ламп

Инж. В. М. СКОБЕЛЕВ

Москва

Для правильной и со-поставимой оценки светового потока люминесцентных ламп следует установить тот электрический параметр, при фиксированном значении которого он определяет-ся. При выборе этого параметра в первую оче-редь надо руководствоваться степенью воспроиз-водимости результатов измерения.

Если для лампы накаливания это требование полностью удовлетворяется при фиксировании значения напряжения или тока лампы, то в слу-чае люминесцентных ламп дело обстоит значи-тельно сложнее.

Как и другие газоразрядные лампы, люминес-центную лампу нельзя включать в сеть без бал-ластного сопротивления, ограничивающего ток. Так как люминесцентная лампа имеет нелиней-ную вольтамперную характеристику, то при по-следовательном включении с ней балластного со-противления как напряжение, так и ток лампы будут несинусоидальны. Форма тока и напряже-ния будет зависеть также от типа (характеристи-ки) балластного сопротивления.

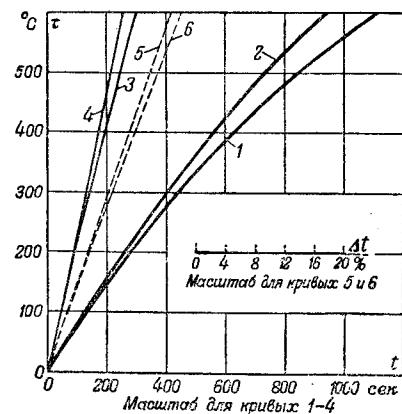
Рассмотрена зависимость световых параметров люминесцентных ламп от типа примененного бал-ластного сопротивления. Показано, что воспроиз-водимые результаты измерения световых параметров люминесцентных ламп можно получить только при условии фиксирования мощности лампы, при кото-рой производится измерение. Указаны требования к электроизмерительным приборам, применяемым при измерениях.

Вследствие несинусои-дальности напряжения и тока в цепи измерения активная мощность, под-водимая к лампе, меньше произведения действую-щих значений этих вели-чин. Следовательно, не-смотря на отсутствие сдвига по фазе между напряжением и током, можно говорить о коэффи-циенте мощности лампы $k = \frac{P}{U_A I_A}$. Есте-

ственно, коэффициент мощности k зависит от вольтамперной характеристики балластного со-противления.

На рис. 1, 2 и 3 приведены осциллограммы напряжения и тока, полученные на вибрационном осциллографе при включении одной и той же люминесцентной лампы через активное сопротивление, дроссель или последовательно вклю-ченные дроссель и конденсатор. В табл. 1 приве-дены замеренные действующие значения напряже-ния и тока, мощность лампы и подсчитанный по этим данным коэффициент мощности k .

Все приведенные в таблице данные определя-



Кривые $\tau = f(t)$ и $\Delta t = f(\tau)$ для чугунного элемента № 62 типа СЖК и токов 400 и 240 а.

Литература

1. Защита устройств электрификации от токов короткого замыкания (электровозов), ч. 1, ЛИИЖТ, 1951, для ЦЭ МПС, стр. 85.
2. О. Д. Хвольсон. Курс физики, т. III, стр. 142, изд. 1907.
3. Советские магистральные электровозы, стр. 639. Трансжелдориздат, 1941.

[6. 2. 1954]

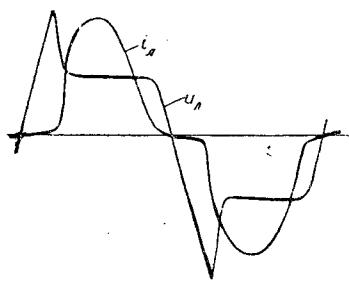


Рис. 1. Осциллограмма тока и напряжения на люминесцентной лампе, включенной последовательно с активным сопротивлением (вибрационный осциллограф).

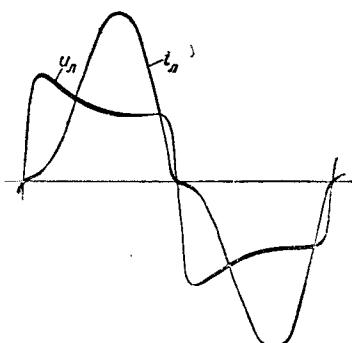


Рис. 3. Осциллограммы тока и напряжения на люминесцентной лампе, включенной последовательно с дросселем и конденсатором.

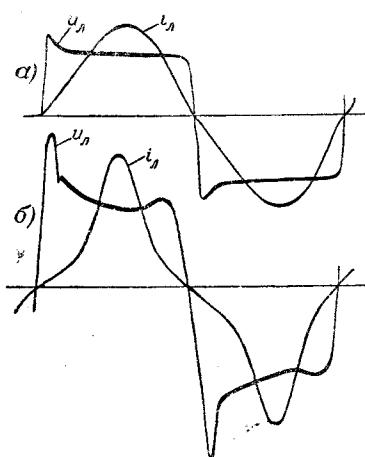


Рис. 2. Осциллограммы тока и напряжения на люминесцентной лампе, включенной последовательно с дросселем.
 а — дроссель с практически линейной вольтамперной характеристикой; б — сильно насыщенный дроссель ($B = 18\ 000\ gс$).

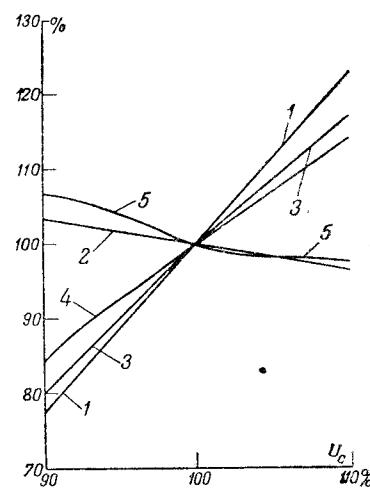


Рис. 4.

1 — ток; 2 — напряжение на лампе; 3 — мощность; 4 — световой поток; 5 — световая отдача в зависимости от напряжения сети для люминесцентной лампы мощностью 15 вт, включенной последовательно с дросселем.

ле при ненасыщенном (рис. 2, а) и сильно насыщенном дросселе (рис. 2, б).

При сопоставлении рис. 4 и 5 обнаруживается, что тип балластного сопротивления оказывает влияние на характер зависимости параметров ламп от напряжения сети.

Для повышения степени сопоставимости измерений целесообразно питать схему от стабилизатора напряжения. Доступные стабилизаторы феррорезонансного типа искажают форму волн напряжения, а следовательно, и форму тока и

Таблица 1

Рисунок	$U_A, в$	$I_A, а$	$P_A, вт$	k
1 (активное сопротивление)	63,5	0,335	15	0,703
2, а (дроссель)	58	0,280	15	0,920
3 (последовательно включенные дроссель и конденсатор)	61	0,31	15	0,790

лись при одном и том же напряжении сети питания.

Одного указания типа балластного сопротивления недостаточно для воспроизведения результатов измерения; например, данные табл. 2 получены для одной и той же люминесцентной лампы и при балластном сопротивлении в виде дросселя, но индукция в дросселях была разной.

Таблица 2

Дроссель	Магнитная индукция в сердечнике дросселя, $gс$	$U_A, в$	$I_A, а$	$P_A, вт$	k
1	12 000	57	0,30	15	0,877
2	18 000	51	0,36	15	0,817

Это иллюстрирует также и рис. 2, на котором сопоставлены кривые тока и напряжения на лам-

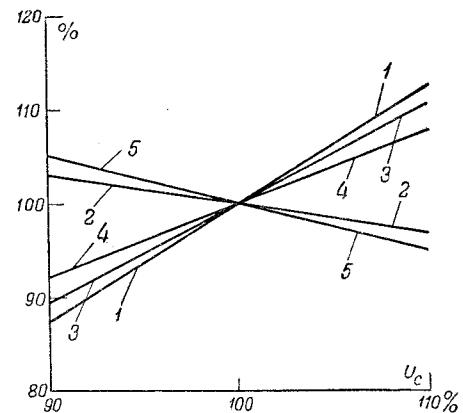


Рис. 5.

1 — ток; 2 — напряжение на лампе; 3 — мощность; 4 — световой поток; 5 — световая отдача в зависимости от напряжения сети для люминесцентной лампы мощностью 15 вт, включенной последовательно с дросселем и конденсатором.

вместе с ней и другие параметры, в частности световые (рис. 6).

В табл. 3 сопоставлены электрические и световые характеристики люминесцентной лампы мощностью 15 вт при питании ее непосредственно от сети и через стабилизатор напряжения.

Таблица 3

Напряжение сети, в	Питание непосредственно от сети			Через стабилизатор		
	I_A , а	P_A , вт	F_A , %	I_A , а	P_A , вт	F_A , %
110	0,234	12,5	83	0,200	10,7	73
120	0,290	14,7	97,5	0,250	12,7	85,5
130	0,340	16,7	107	0,300	14,8	97
140	0,400	18,7	117,5	0,370	16,5	107

Примечание. Световой поток при мощности 15 вт и отсутствии стабилизатора принят за 100%.

Как видно из табл. 3, при одном и том же напряжении при наличии стабилизатора ток и мощность всегда будут меньше. Из таблицы также видно, что при одной и той же мощности световые потоки при обоих способах питания практически одинаковы.

Таким образом, при фиксации мощности лампы применение феррорезонансного стабилизатора напряжения не исказит светового потока лампы.

Более подробные исследования показали, что световой поток при заданной мощности лампы остается практически неизменным, если коэффициент мощности лампы больше 0,8. Это вполне соответствует результатам работ Б. Н. Клярфельда [Л. 2], Ф. А. Бутаевой и В. А. Фабриканта [Л. 3], показавшим, что интенсивность излучения резонансных линий ртути при низком давлении определяется в первую очередь давлением паров ртути, которое зависит от температуры стенок колбы лампы, определяемой в свою очередь ее мощностью. Поэтому для получения сравнимых между собой результатов измерения светового потока необходимо в качестве фиксируемого параметра выбирать мощность лампы.

При измерениях в качестве балластного сопротивления лучше всего использовать дроссель с индукцией¹ не более 12 000 Гц, что обеспечивает практически линейную вольтамперную характеристику. Основное достоинство схем с дросселем то, что как электрический, так и световой режимы лампы в широких пределах не зависят от питающего напряжения (табл. 4).

Исходя из изложенного, можно с уверенностью сказать, что результаты М. Ш. Капника [Л. 1], при которых в качестве фиксируемого параметра было принято действующее значение тока, невоспроизводимы.

При измерении существенным фактором является влияние шунтирующего действия вольтметра и вольтметровой цепи ваттметра. В схеме следует применять вольтметры и ваттметры с большим внутренним сопротивлением (не менее 100 ом/в).

Вольтметр и ваттметр подключаются непосредственно к лампе. При этом амперметр измеряет также ток вольтметра и вольтметровой цепи ваттметра, однако сопротивление измеряемых це-

¹ Указываемое значение индукции относится к горячекатанной трансформаторной стали.

Рис. 6. Сетевое напряжение и напряжение на люминесцентной лампе, включенной последовательно с дросселем, при питании схемы непосредственно от сети (а) и через феррорезонансный стабилизатор (б) (зарисовано с электронного осциллографа).

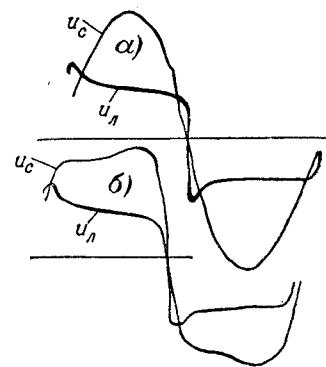


Таблица 4

Тип балласта	Напряжение сети, в	Световой поток, %	Ток лампы, а	Напряжение на лампе, в
Дроссель	127	100	0,29	57,5
	220	100	0,29	58
Активное сопротивление . . .	127	91,3	0,34	63
	220	96	0,305	60
Активное сопротивление и конденсатор	127	81,5	0,43	66
	220	98	0,31	58

пей сравнительно велико, так что ошибка в определении тока весьма мала.

Применимый для питания схемы автотрансформатор должен быть достаточной мощности (типа ЛАТР), с тем чтобы его полное сопротивление было мало сравнительно с сопротивлением дросселя. Активная составляющая сопротивления дросселя должна быть минимальной.

Выводы. 1. Воспроизводимые световые параметры люминесцентных ламп можно получить, если измерения производятся при фиксированной (номинальной) мощности, потребляемой лампой, и использовании в качестве балластного сопротивления дросселя с малыми активными потерями и практически линейной вольтамперной характеристикой в области измерения.

2. Для получения высокой воспроизводимости электрических параметров ламп следует принять меры к строгому постоянству формы волны тока, питая для этой цели схему, например, от феррорезонансного стабилизатора напряжения с исправленной формой волны (например, типа КРСС-0,5).

Литература

1. М. Ш. Капник. Схема включения люминесцентных ламп при измерении. Электричество, № 9, 1953.
2. Б. Н. Клярфельд. Световая отдача газового разряда. ИАН. Серия физ., № 3, 1936.
3. Ф. А. Бутаева и В. А. Фабрикант. Влияние параметров разряда на интенсивность линий 1850 и 2537 Å в люминесцентных лампах. ИАН. Серия физ. XIII, № 2, стр. 271, 1949.

[29. 3. 1954.]



Из опыта работы

Включение синхронных машин способом самосинхронизации без проверки частоты

Инж. Ф. Г. РЫКЛИН

Самосинхронизация синхронных генераторов и компенсаторов, как эксплуатационный способ включения на параллельную работу генераторов приобретает большое распространение. При ручной синхронизации в качестве прибора, контролирующего частоту подключаемого генератора, чаще всего применяется частотомер. При автоматической или полуавтоматической синхронизации применение нашло реле ИРЧ.

Подгонка частоты требует некоторого, хотя и небольшого, времени. Кроме того, оборудование небольших установок частотомерами и тем более реле типа ИРЧ иногда затруднительно ввиду дефицитности реле. В настоящей статье сообщается об опыте применения самосинхронизации синхронных машин небольшой мощности без проверки частоты.

Следующие обстоятельства позволили осуществить это упрощение способа пуска.

Как показывает опыт эксплуатации, при подключении на параллельную работу по способу самосинхронизации без всякого ущерба для генератора можно допустить значительное скольжение. Затем для генераторов небольшой мощности удлинение переходного процесса с 1...2 сек до 6...8 сек не имеет практического значения.

На реконструируемой ГЭС в связи со снижением располагаемой мощности в процессе строительства использовались для нужд строительства и города два дизель-генератора со следующими характеристиками.

Первичный двигатель — дизель типа М-17 ЧТЗ мощностью 65 л. с., 750 об/мин, регулятор скорости прямого действия центробежного типа.

Генераторы — фирмы ASEA, переменного тока, трехфазные, синхронные, 750 об/мин, 220 в; схема соединения обмоток статора — треугольник, ротор с явновыраженными полюсами без успокоительных контуров, возбудитель на одном валу с генератором и дизелем. Возбудитель на глухо присоединен к ротору генератора, АГП отсутствует. Регулирование возбуждения осуществляется вручную регулятором параллельного возбуждения. Возбудитель имеет компаундное возбуждение. Мощность одного генератора 83, другого 50 ква. Мощность возбудителей обоих генераторов — 2,5 квт, 100 в.

Генераторы включались на параллельную работу по методу самосинхронизации без проверки

На основе положительного опыта эксплуатации по включению на параллельную работу дизель-генераторов и компенсатора мощностью 125 ква без контроля частоты (тахометром или реле ИРЧ) за счет некоторого удлинения времени пуска и увеличения скольжения автор предлагает внедрять этот упрощенный способ самосинхронизации для установок малой мощности.

частоты как между собой на генераторных шинах, так и с относительно мощной сетью через трансформаторную связь.

Подготовка к внедрению описываемого метода заключалась в том, что

при помощи переносного тахометра была измерена скорость вращения генератора на холостом ходу, соответствующая его номинальной частоте. Соответствующее этой скорости положение рукоятки регулятора скорости было зафиксировано меткой. При этом имелось в виду, что фиксированному положению рукоятки регулятора может соответствовать скорость вращения дизеля, отличающаяся от определенной при измерении тахометром вследствие изменения температуры помещения, вида топлива, состояния форсунок и пр. Чтобы выяснить практическое влияние этих факторов, было произведено 20 включений при искусственно созданном скольжении $\pm 15\%$.

При этих опытных включениях втягивание машины в синхронизм происходило без ощутимых толчков, никаких ненормальностей не наблюдалось. Случаев сгорания предохранителей (типа ПР-200) при включении не наблюдалось. По визуальным наблюдениям за показаниями амперметра качания продолжались 3...6 сек.

Иногда имело место изменение полярности полюсов возбудителя — явление, само по себе не имеющее существенного значения и не представляющее какой-либо опасности, но оно неприятно действовало на персонал, так как магнитоэлектрические приборы цепи возбуждения начинали показывать в обратную сторону. В связи с этим магнитоэлектрические приборы были заменены электромагнитными.

После проведения описанной наладки включение машин на параллельную работу по методу самосинхронизации без проверки частоты было внедрено как эксплуатационный метод.

За 1,5-годичный срок внедрения этого способа¹ было произведено свыше тысячи включений с неизменным успехом.

Интересно отметить, что за все время эксплуатации проверка соответствия фиксированного положения рукоятки регулятора скорости вращения дизеля ни разу повторно не производилась.

В 1953 г. описываемый метод был внедрен

¹ В период сезона максимума дизель-генераторы и теперь работают.

еще на одной дизель-электрической установке 125 ква, включаемой в параллель с сетью через трансформаторную связь, и для компенсатора 125 ква с разгонным двигателем.

Во всех случаях применение этого метода привело к сокращению численности дежурного персонала. Обслуживание дизель-генераторов и включение их на параллельную работу ведется дизелистом, овладевшим второй профессией — электрика.

Навык по включению генератора способом самосинхронизации без проверки частоты приобретается очень быстро. Порядок включения состоит из двух несложных операций²:

1. Дизелист пускает дизель и устанавливает рукоятку регулятора на метку. Сопротивление регулятора параллельного возбуждения при этом введено полностью.

2. Включается рубильник или автомат генератора и форсируется возбуждение. Набирается активная и реактивная нагрузки.

Пуск компенсатора производится аналогично.

² В связи с пуском в условиях глухоприключенного возбудителя остаточное напряжение на подключаемом генераторе, как показала практика, может составлять 0,15 ... 0,25 U_n , но опасаться этого не следует.

Выводы. 1. Метод самосинхронизации без проверки частоты, как показывает опыт, упрощает эксплуатацию, уменьшает количество пусковой аппаратуры и позволяет снизить численность обслуживающего персонала.

2. Судя по результатам опыта эксплуатации, самосинхронизация без проверки частоты может быть внедрена для дизель-генераторов и компенсаторов.

3. Наиболее простой и рациональной схемой возбуждения следует считать схему с глухоприключенным возбудителем.

Повышенное остаточное напряжение (0,15 ... 0,25 U_n), как показывает опыт, опасности не представляет.

4. Необходимо в ближайшее время провести испытания для генераторов с другими первичными двигателями — в первую очередь испытания при первичных двигателях с относительно постоянными параметрами движения: локомобили, паровая турбина.

5. Самосинхронизация без проверки частоты позволит значительно упростить схему автоматического включения, так как импульс на включение выключателя подключаемого генератора можно подать при вполне определенной скорости вращения — от соответствия положения рукоятки регулятора скорости заданному.

[6. 4. 1954]



Об улучшении использования сварочных трансформаторов

Инж. А. А. ГОРЬКОВ

Москва

В цехах промышленных предприятий, имеющих большое количество работающих раздельно сварочных трансформаторов, потери электроэнергии, связанные с холостыми ходами и низким коэффициентом мощности, достигают значительной величины. Это объясняется тем, что сварочный трансформатор большую часть времени (около 70%) работает в режиме холостого хода. В нагруженном же режиме далеко не все трансформаторы бывают полностью загружены. Между тем известно, что коэффициент мощности сварочного трансформатора при холостом ходе равен 0,15 ... 0,2, а потребляемая им в этом режиме мощность — 300 ... 400 вт.

Кроме этого, при существующей системе организации электросварочных работ на предприятиях сварочные трансформаторы и связанная с ними аппаратура занимают значительную долю производственной площади. Будучи рассредоточенными на всей площади, занимаемой цехом, и находясь под напряжением, они представляют большую опасность для работающего в цехе пер-

сонала. Неизбежные перемещения трансформаторов с одного места на другое приводят к частым

поломкам и сокращению междуремонтного срока их работы. Надзор за раздельно работающими трансформаторами крайне затруднен.

Предпринимавшиеся в последние годы попытки ограничить холостые ходы сварочных трансформаторов путем применения сложных схем с быстродействующей аппаратурой не дали желаемого эффекта вследствие быстрого износа последней. Кроме того, условия зажигания дуги при пониженном напряжении (36 в), которое применялось в этих схемах, были хуже, чем при напряжении 65 в.

Разработанная автором и рассматриваемая схема параллельной работы сварочных трансформаторов с автоматическим регулированием мощности (рис. 1) не имеет указанных выше недостатков и позволяет простыми средствами решить проблему ограничения холостых ходов сварочных трансформаторов. При этом до 70% сварочных трансформаторов высвобождается.

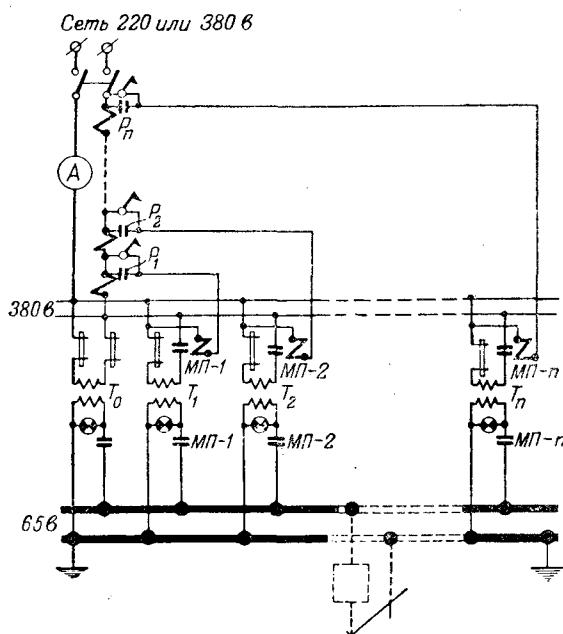


Рис. 1. Схема параллельной работы сварочных трансформаторов с автоматическим регулированием мощности.
 P — реле тока прямого включения; T — сварочный трансформатор; $МП$ — магнитный пускатель.

На основе опыта и наблюдений было установлено, что при использовании трансформаторов по времени на 30 %, а по мощности на 80 % коэффициент спроса электросварочной установки $k = 0,3 \cdot 0,8 = 0,24$. Следовательно, общая установленная мощность трансформаторов при их параллельной работе

$$P_n = k_c P_{usm},$$

где P_{usm} — общая установленная мощность трансформаторов при их раздельной работе.

Однако величина k_c практически значительно ниже 0,24, поэтому для полной ликвидации холостых ходов применено автоматическое регулирование мощности. В результате 70 % трансформаторов полностью высвобождается, а оставшиеся работают параллельно, группируясь в один или несколько автоматизированных блоков.

Схема предусматривает ручное или автоматическое включение и выключение каждого трансформатора. В последнем случае трансформатор T_0 включается только вручную, являясь как бы дежурным, а все остальные включаются или отключаются автоматически по мере изменения нагрузки.

Реле тока P_1, P_2, \dots, P_n , включенные последовательно в цепи 380 или 220 в, срабатывают поочередно в соответствии с уставками тока и включают или выключают магнитные пускатели $МП$, размыкающие один полюс на стороне 380 в, и один полюс на стороне 65 в каждого трансформатора.

Так как трансформатор T_0 будет использоватьсь по времени на 100 %, холостой ход трансформаторов полностью исключается. В периоды наи-

более интенсивной работы электросварщиков необходимо включать в качестве дежурных не один, а несколько трансформаторов. Благодаря этому автоматика будет действовать реже, и надежность работы электроаппаратуры повысится.

Известно, что при выключении трансформатора из параллельной работы сопротивление на контактах магнитного пускателя постепенно возрастает и вследствие этого нагрузка переходит на трансформаторы, оставшиеся включенными в параллель. Поэтому на контактах пускателя не проходит дугообразования.

Измерительные приборы и сигнальные лампы в схеме, вообще говоря, не являются обязательными.

В схеме применены реле тока типа Р-4000 завода «Динамо» с незначительной их переделкой и магнитные пускатели типа П-412. Для цепи 65 в были использованы две пары параллельных контактов пускателя.

Экономия электроэнергии при переходе на новую схему получается за счет полной ликвидации потерь холостого хода на всех действующих при старой схеме трансформаторах, сокращения потерь электроэнергии в сети и сокращения потерь в трансформаторах вследствие повышения их к. п. д.

Отношение потерь в сети при новой схеме к потерям при старой схеме

$$\frac{\Delta P_n}{\Delta P_c} = \frac{\cos^2 \varphi_c}{\cos^2 \varphi_n},$$

где $\cos \varphi_c$ — коэффициент мощности при старой схеме;

$\cos \varphi_n$ — коэффициент мощности при новой схеме.

Экономия электроэнергии, получаемая от перехода к новой схеме, может быть определена в 15 ... 20 %. Точный подсчет экономии электроэнергии следует производить в каждом отдельном случае с учетом особенностей и конфигурации существовавшей и реконструированной распределительной электросети электросварочной установки.

Для автоматизированных блоков следует подбирать сварочные трансформаторы с одинаковыми параметрами; во избежание короткого замыкания перед включением трансформаторов необходимо производить их фазировку.

Наибольший эффект новая схема может дать в крупных сборочных цехах заводов металлоконструкций и судостроительных заводов.

На рис. 2 показано размещение работающих раздельно сварочных трансформаторов, а на

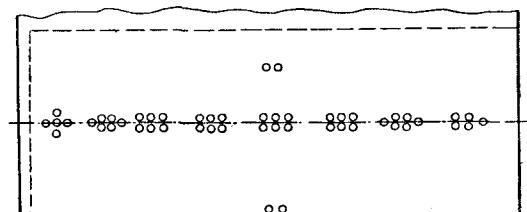


Рис. 2. Расположение сварочных трансформаторов при старой схеме (пунктиром показана сварочная площадка цеха).

рис. 3 — автоматизированных трансформаторных блоков в одном и том же цехе завода и для одного и того же количества сварочных постов.

Чтобы избежать несимметрии нагрузки, трансформаторные блоки при их значительном количестве присоединяются к разным фазам. Как видно из рис. 3, три трансформаторных блока *A*, *B*, *Г*, расположенных по осевой линии сварочной площадки, обеспечивают питание всех постов без удлинения сварочных проводов. Сечение кабеля, которым выполнена вспомогательная сварочная магистраль *A* — *Б*, должно быть проверено на падение напряжения. На конце магистрали *A* — *Б* желательно установить один из дежурных трансформаторов, управляемый со стороны высокого напряжения с центрального трансформаторного блока *A*. Этим трансформатором согласно схеме рис. 1 может быть трансформатор *T*₁ или *T*₂. При таком расположении магистраль работает при малых токах, т. е. с наименьшими потерями электроэнергии. В соответствии с расположением сварочных постов наиболее мощный блок должен располагаться в центре сварочной площадки, блоки *B* и *Г* на флангах площадки могут иметь меньшую мощность.

Для предохранения дежурных трансформаторов от перегрева уставки их реле следует прини-

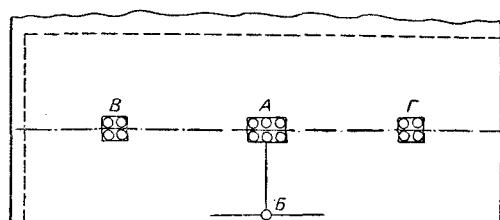


Рис. 3. Расположение сварочных трансформаторов при новой схеме (пунктиром показана сварочная площадка цеха).

мать несколько меньшими номинального тока трансформаторов. Уставки же реле других, недежурных трансформаторов, используемых лишь периодически, могут быть приняты равными номинальному току трансформаторов.

Опыт внедрения новой схемы на одном из заводов показал ее значительную эффективность и надежность. Электроаппаратура свыше 10 мес. работала без какого-либо ремонта. Широкое применение предлагаемой схемы должно привести к резкому сокращению спроса на сварочные трансформаторы, что в конечном итоге даст экономию цветных металлов, трансформаторной стали и прочих материалов.

[6. 4. 1954]

◆ ◆ ◆

Из истории электротехники

Магнитные усилители

В последние годы наблюдается быстрое развитие и значительное расширение области применения магнитных усилителей. В отечественной литературе вопросы истории и развития магнитных усилителей недостаточно освещены, а в иностранной литературе [Л. 1, 2, 3] они рассматриваются по меньшей мере односторонне, с пропуском работ русских и советских ученых и инженеров, которые еще на заре развития магнитных усилителей (не говоря уже о более поздних работах) внесли весьма существенный вклад в эту область техники. Наши соотечественниками были предложены многочисленные новые типы и схемы магнитных усилителей, которые до сих пор не потеряли своего практического значения.

В настоящей статье авторы ограничиваются рассмотрением лишь небольшой части наиболее интересных работ отечественных ученых в области магнитных усилителей.

Из предистории магнитных усилителей. Следует отметить, что именно русскими учеными и изобретателями были созданы предпосылки, на основании которых в дальнейшем появились пер-

вые магнитные усилители. Укажем прежде всего на замечательную работу выдающегося русского физика А. Г. Столетова «Исследование о функции намагничивания мягкого железа», представленную им в 1871 г. на соискание ученой степени доктора наук и опубликованную отдельной брошюрой в 1872 г. В этой работе А. Г. Столетов с исчерпывающей полнотой впервые установил основные законы намагничивания ферромагнитных материалов и показал, что зависимость магнитной индукции таких материалов от напряженности магнитного поля (т. е. кривая намагничивания) имеет нелинейный характер.

До Столетова считалось, что магнитная проницаемость и магнитная восприимчивость (названная Столетовым «функцией намагничения») не зависят для ферромагнитных материалов от величины напряженности магнитного поля. В речи при защите своей диссертации А. Г. Столетов говорил по этому поводу [Л. 4, стр. 79]: «О том, как изменяется функция намагничения при слабых силах, почти не найдем в литературе ясных указаний. Принималось обыкновенно, что здесь

она удовлетворяет первоначальному допущению Пуассона — не зависит от величины силы. Развитая Вебером гипотеза о сущности процесса намагничения приводила к тому же заключению».

В своей работе А. Г. Столетов показал, что с повышением намагничивающего поля магнитная проницаемость ферромагнитных материалов сначала растет, достигает некоторого максимального значения и затем в области сильных полей убывает. Таким образом, он впервые установил основное свойство ферромагнитных материалов, которое лежит в основе магнитных усилителей, а именно, — нелинейный характер кривой намагничивания таких материалов.

Столетов предвидел то важное значение, которое будет иметь нелинейный характер кривой намагничивания (т. е. непостоянство «функции намагничения») для различных электромагнитных механизмов. В заключении своей работы он писал: «...Изучение функции намагничения железа может иметь практическую важность при устройстве и употреблении как электромагнитных двигателей, так и тех магнитоэлектрических машин нового рода, в которых временное намагничение железа играет главную роль... Знание свойств железа относительно временного намагничения также необходимо здесь, как необходимо знакомство со свойствами пара для теории паровых машин. Только при таком знании мы получим возможность обсудить наивыгоднейшую конструкцию подобного снаряда и на вперед рассчитать его полезное действие».

Значение работ А. Г. Столетова для последующего развития магнитных усилителей не ограничивается открытием нелинейного характера кривой намагничивания ферромагнитных материалов. До него исследования магнитных свойств железа всегда производились на разомкнутых образцах, выполненных обычно в виде шаров, эллипсоидов или цилиндров. Столетов впервые применил тороидальные (кольцевые) сердечники. Из упомянутой выше работы, а также из другой работы Столетова, написанной в 1873 г. [Л. 5], вытекало, что для максимального использования нелинейного характера кривой намагничивания ферромагнитных материалов следует использовать замкнутые, например, тороидальные сердечники. В указанных работах А. Г. Столетов показал, что кривая намагничивания разомкнутых железных тел всегда имеет более линейный характер и их «функция намагничения» (т. е. магнитная проницаемость) всегда меньше, чем у магнитного вещества и у тороидальных сердечников. Как известно, в настоящее время в магнитных усилителях широко применяют тороидальные сердечники для лучшего использования нелинейного характера кривой намагничивания ферромагнитных материалов.

В 1876 г. замечательный русский изобретатель П. Н. Яблочкив изобрел трансформатор. В 1882 г. сотрудник профессора Столетова по Московскому университету И. Ф. Усагин демонстрировал сконструированный им трансформатор на выставке в Политехническом музее в Москве [Л. 6]. В статье, опубликованной в журнале

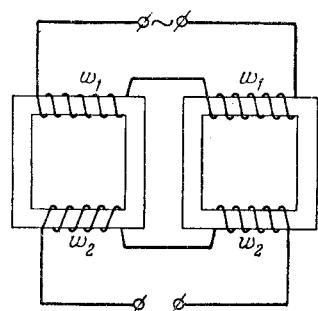


Рис. 1

«Электричество» (№ 13—14, 1889), А. Г. Столетов писал: «Невольно вспоминается та травля, которой подвергались трансформаторы в нашем отечестве, по поводу недавнего проекта фирмы Ганца и К° осветить часть Москвы... забывают, что первую идею о трансформации тока в технике сами иностранцы приписывают Яблочкиву (см. например, Fontaine, Eclairage à l'Electricité, 3 ed. 1888, p. 463), и что на Всероссийской выставке 1882 г. в Москве, ранее Голяра — Гиббса и др., весьма определенно демонстрировал такую систему г. Усагин, за что награжден медалью».

Нелинейный характер кривой намагничивания ферромагнитных материалов открытый Столетовым, и трансформаторы Яблочкива и Усагина легли в основу магнитных усилителей, магнитных удвоителей частоты, магнитных модуляторов, измерительных трансформаторов постоянного тока и аналогичных устройств.

В течение первых двух десятилетий 20 в. возникают совершенно новые для того времени электромагнитные устройства, основанные на использовании нелинейного характера кривой намагничивания ферромагнитных материалов. В эти годы были созданы первые дроссели, индуктивность которых управлялась путем подмагничивания (насыщения) их сердечников постоянным током. Такие устройства, которые были названы дросселями насыщения, представляли собой два одинаковых трансформатора с замкнутыми железными сердечниками, вторичные обмотки которых включались встречно по отношению к первичным w_1 для развязки первичной цепи от вторичной (рис. 1). Первичные обмотки включались в цепь переменного тока, а управление осуществлялось путем подачи постоянного тока во вторичные обмотки w_2 . Тогда же на основе схемы рис. 1 были созданы первые магнитные удвоители частоты, измерительные трансформаторы постоянного тока и магнитные модуляторы. Все эти устройства являются непосредственными предшественниками современных магнитных усилителей.

В развитии и усовершенствовании различных устройств на основе схемы рис. 1 с использованием нелинейного характера кривой намагничивания ферромагнитных материалов участвовали инженеры и ученые многих стран, в их числе и русские ученые. Например, академик Н. Д. Папалекис один из первых еще в 1914 г. использовал дроссели, управляемые постоянным током, для

целей регулирования напряжения. Первые работы члена-корреспондента АН СССР В. П. Вологдина по использованию свойств ферромагнитных цепей при намагничивании постоянным и переменным полями для умножения частоты относятся к 1911 г. Ряд умножителей его конструкции нашел применение на отечественных радиостанциях.

В. П. Вологдин и Н. Д. Папалекси (совместно с Л. И. Мандельштамом) в дальнейшем предложили [Л. 7, 8] новые типы и схемы магнитных усилителей.

Развитию магнитных усилителей способствовали своими трудами и многие другие отечественные ученые и изобретатели. Необходимо указать на работы выдающегося советского физика члена-корреспондента АН СССР В. К. Аркадьева, являющегося основоположником учения о поведении ферромагнитных материалов в переменных магнитных полях. Результаты его многочисленных исследований в этой области, первые из которых были выполнены еще в 1908 г., неоднократно использовались не только в прошлом, но широко применяются и в настоящее время при анализе, расчете и проектировании различных типов магнитных усилителей и аналогичных устройств. Известная двухтомная монография В. К. Аркадьева [Л. 9] обобщила многолетние исследования, выполненные им, и до сих пор является настольной книгой инженеров и научных работников в области магнитных усилителей.

Первый магнитный усилитель звуковых частот. Практическое применение магнитные усилители получили за последние годы главным образом для усиления сигналов постоянного и медленно изменяющегося токов. Многие авторы и исследователи считали, что магнитные усилители совершенно непригодны для усиления сигналов звуковой частоты. Однако в последние годы в связи с большими успехами в области применения магнитных усилителей постоянного тока значительно возрос интерес и к магнитным усилителям звуковых частот. Этот интерес объясняется прежде всего высокой степенью надежности магнитных усилителей. В советских научно-исследовательских институтах и лабораториях созданы магнитные усилители звуковых и более высоких частот. В технической литературе опубликован ряд статей, в которых указывается на возможность и даже целесообразность создания магнитных усилителей звуковых частот [Л. 10—13]. Появились и патенты на магнитные усилители звуковых частот [Л. 14]. На основе этих работ часто делают выводы о том, что магнитные усилители звуковых частот — это новые, ранее неизвестные типы магнитных усилителей, предложенные лишь в последнее время, и что усиление звуковых частот при помощи магнитных усилителей — это совершенно новая область применения магнитных усилителей. Однако такие выводы являются глубоко ошибочными.

Первые дроссели насыщения работали на промышленной частоте и применялись главным образом для ручной установки величины переменного тока в силовых цепях. Впервые применение дрос-

селей насыщения на высоких частотах и управление ими сигналами звуковой частоты было описано в литературе в статьях Кюна, опубликованных в 1914 и 1915 гг. [Л. 15]. Кюн предложил схемы применения дросселей насыщения для модуляции высокочастотного (несущего) тока антенны мощной радиотелефонной передающей станции токами звуковой частоты, а также описал некоторые результаты своих исследований.

Применение дросселя насыщения для аналогичной цели, т. е. для модуляции высокой (несущей) частоты в антenne сигналами передаваемой звуковой частоты было предложено также шведским инженером Александерсоном [Л. 16, 17]. В своей работе, которая была опубликована в 1916 г., Александерсон назвал предложенный им магнитный модулятор «магнитным усилителем», так как мощность модулирующего сигнала была значительно меньше управляемой мощности высокой частоты в антenne. Это было первое упоминание в литературе о «магнитных усилителях»; повидимому, поэтому в американской литературе склонны считать Александерсона (работающего в американской фирме) основоположником магнитных усилителей. Однако такой вывод лишен всякого основания.

Действительно, если под магнитным усилителем понимать статическое электромагнитное устройство, позволяющее при помощи сигнала постоянного тока или «низкой» частоты управлять значительно большей мощностью переменного тока более высокой частоты, то все дроссели насыщения, которые применялись и были описаны значительно раньше «магнитного усилителя» Александерсона, не говоря уже о магнитном модуляторе Кюна, по существу также являются магнитными усилителями.

Основным требованием, предъявляемым к усилителям звуковых частот, является неискаченное воспроизведение на выходе усилителя формы сигнала, подаваемого на вход. Следовательно, предложенные Кюном и Александерсоном электромагнитные устройства не могут быть названы усилителями звуковых частот и являются лишь модуляторами. Характерно, что во всех тех случаях, когда необходимо было усиливать микрофонные токи, Александерсон использовал исключительно ламповые усилители. В частности, между его магнитным модулятором и микрофоном включался трехкаскадный ламповый усилитель [Л. 18, 19]. Для модулятора использовались четырехстержневой сердечник и параллельное соединение обмоток переменного тока w . При этом, для того чтобы эти обмотки не образовали короткозамкнутый контур для усиливаемых сигналов, последовательно с каждой обмоткой w включена емкость C . Конденсатор C_1 служит для настройки системы в резонанс на несущей частоте. Сигнал на входе модулятора нарушает настройку и вызывает изменение тока в антenne.

Первый магнитный усилитель звуковых частот предложил в 1920 г. советский инженер и ученый, впо-

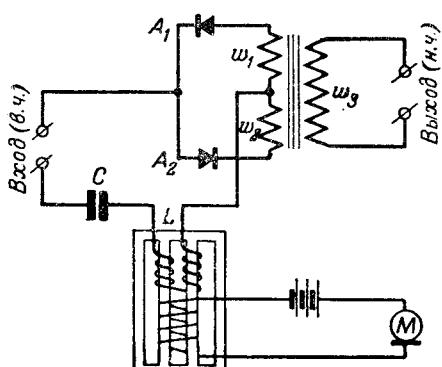


Рис. 2

следствии академик Клавдий Ипполитович Шенфера [Л. 20]. На этот магнитный усилитель, названный им «Устройством для усиления микрофонного тока с применением самоиндукции», выдан советский патент за № 42 с приоритетом от 19 февраля 1920 г. Принципиальная схема одного из вариантов магнитного усилителя Шенфера показана на рис. 2. В этом усилителе использован четырехстержневой сердечник, предложенный Александерсоном. В указанном патенте Шенфера «предмет изобретения» изложен следующим образом: «Устройство для усиления микрофонного тока с применением самоиндукции, изменяемой посредством изменения силы постоянного тока, влияющего на магнитное насыщение ее сердечника... — характеризующееся тем, что микрофон M введен в цепь постоянного тока, влияющего на самоиндукцию L , которая включена в цепь генератора высокой частоты последовательно с емкостью C , с двумя параллельно-соединенными выпрямителями A_1 , A_2 и с двумя первичными обмотками w_1 и w_2 трансформатора T , соединенными с выпрямителями A_1 и A_2 таким образом, что намагничивающая сила, образованная этими обмотками, всюду направлена в одну и ту же сторону, причем постоянные указанной цепи подобраны так, что она при неподвижной мембране микрофона настроена почти на резонанс напряжений».

Для повышения чувствительности усилителя и его коэффициента усиления Шенфера предложил применить не только схему рис. 2 с резонансом напряжения, но и схему с резонансом токов. В качестве источника питания он рекомендовал использовать генератор повышенной частоты «не ниже примерно 20 000 периодов в секунду». Нагрузка подключается к вторичной обмотке w_3 выходного трансформатора, который позволяет согласовать нагрузку с внутренним сопротивлением усилителя и не пропускает постоянной составляющей продетектированного тока в нагрузку. Применение двух первичных обмоток для трансформатора дает возможность получить двухполупериодное детектирование (выпрямление) с помощью лишь двух вентилей.

Изучение иностранных патентов и литературы по магнитным усилителям на основе обстоятельной библиографии, составленной Майлсом [Л. 3], показывает, что первый магнитный усилитель зву-

ковых частот в США был предложен лишь в 1921 г., и его схема опубликована только в конце 1927 г. [Л. 21]. Однако эта схема оказалась неудачной и практического применения не получила. В цепи управления индуктировалась э. д. с. основной частоты источника питания. Для получения «двуихполупериодного» детектирования на выходе усилителя необходимо было включить через соответствующие детекторы два наушника, каждый из которых работал с однополупериодным детектированием различных полуволн несущей частоты.

Схема Шенфера до сих пор не потеряла своего значения и используется в устройствах для усиления звуковых частот. После того как было установлено, что применение положительной обратной связи в магнитных усилителях позволяет получить необходимый коэффициент усиления при меньшем значении постоянной времени цепи управления, естественно было в схеме Шенфера использовать положительную обратную связь. Уменьшение постоянной времени магнитных усилителей при заданном усиении при введении положительной обратной связи впервые было установлено М. А. Розенблатом в 1946 г. в его работе «Магнитные усилители» и опубликовано в 1949 г. в одноименной книге.

Небольшим изменением схемы рис. 2 мы получим схему с внутренней обратной связью, которая используется у нас в течение многих лет. В иностранной литературе подобные схемы для усиления звуковых частот появились лишь в конце 1951 г. [Л. 10]. В 1953 г. был опубликован американский патент на двухтактный магнитный усилитель звуковых частот [Л. 14], состоящий фактически из двух однотактных усилителей Шенфера с внутренней обратной связью.

Двухтактные магнитные усилители и модуляторы Мандельштама и Папалекси. Из всех схем магнитных усилителей напряжения и балансных магнитных модуляторов, у которых частота выходного напряжения совпадает с частотой источника питания, наибольшее предпочтение в настоящее время отдается мостовой схеме. Двухтактные магнитные усилители мощности, выполненные

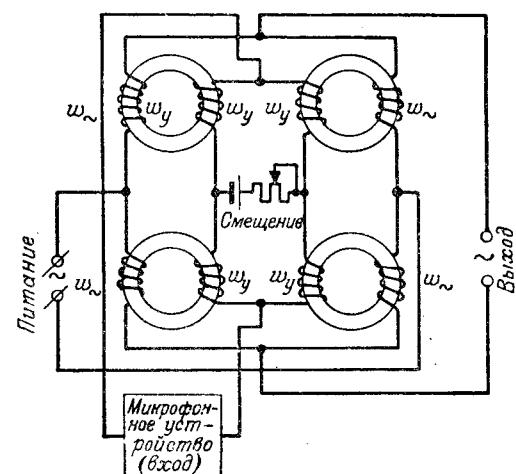
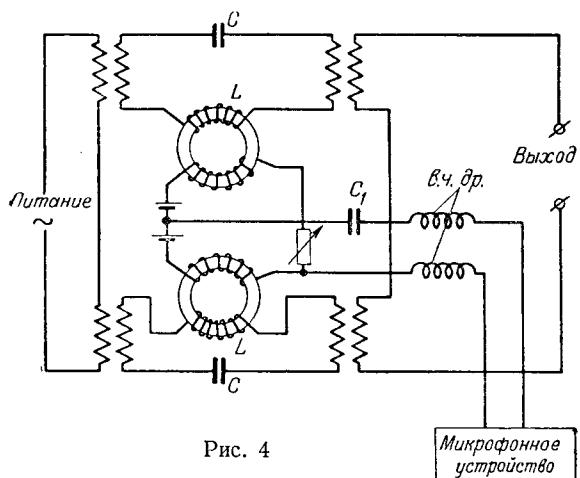


Рис. 3



по мостовой схеме, также широко применяются в схемах управления двигателями переменного тока и имеют существенные преимущества перед двухтактными усилителями, выполнеными по дифференциальной и трансформаторной схемам [Л. 22]. Мостовая схема впервые была предложена академиками Л. И. Мандельштамом и Н. Д. Папалекси в 1925 г., рис. 3 [Л. 8]. Современные мостовые магнитные усилители и модуляторы по существу не отличаются от схемы Мандельштама и Папалекси. Эта схема интересна еще тем, что одни и те же обмотки используются и для смещения (начального подмагничивания), и для сигнала. При этом благодаря соединению обмоток постоянного тока по мостовой схеме ток смещения не поступает в источник усиливаемого сигнала, а усиливаемый сигнал не поступает в источник тока смещения. Использование одних и тех же обмоток для смещения и для сигнала по методу Мандельштама и Папалекси часто оказывается целесообразным и в других двухтактных усилителях.

Кроме советского патента [Л. 8], Мандельштаму и Папалекси был выдан на мостовую схему по рис. 3 ряд иностранных патентов, в частности немецкий патент [Л. 23] по заявке от 1927 г. Затем первый магнитный усилитель по мостовой схеме, ничем по существу не отличающейся от схемы Мандельштама и Папалекси, был предложен Соренсеном [Л. 24] лишь в 1930 г., т. е. позднее на четыре с лишним года.

Наряду с мостовой схемой Мандельштам и Папалекси предложили дифференциальную резонансную схему, которая, как они указали, отличается «особой чувствительностью» [Л. 8]. Эта схема рис. 4 состоит из двух одинаковых резонансных контуров LC . При отсутствии сигнала эти контуры имеют одинаковую расстройку, и выходное напряжение равно нулю. Усиливающий сигнал вызывает повышение индуктивности одного дросселя и уменьшение индуктивности другого, вследствие чего сопротивление одного контура растет, а другого падает и на выходе появляется соответствующее напряжение. Как и в мостовой схеме, здесь одни и те же обмотки используются для сигнала и для смещения. Схема

ма предназначалась для усиления микрофонных токов и модулирования ими несущей частоты передающей радиостанции. Поэтому здесь оказалось возможным включить в цепи управления конденсатор C_1 , препятствующий проникновению постоянного тока в источник усиливаемого сигнала. Так как при наличии сигнала э. д. с. с частотой источника питания наводится в цепи управления, то в этой цепи включены два высокочастотных дросселя. Отметим, что если вместо одного сердечника применять два сердечника для каждого управляемого дросселя резонансных контуров, то конденсатор C_1 и высокочастотные дроссели становятся излишними.

Мостовой магнитный усилитель с обратной связью и бесконтактное реле. Первые магнитные усилители с положительной обратной связью осуществлялись по дроссельной (однотактной) схеме. Такие усилители, как известно, отличаются существенным недостатком, состоящим в том, что ток холостого хода (т. е. ток покоя) таких усилителей является крайне нестабильной величиной. Ток холостого хода изменяется в широких пределах при изменениях напряжения и частоты источника питания, сопротивления нагрузки, тока смещения, коэффициента обратной связи и т. п. От этого недостатка свободны магнитные усилители, осуществляемые по мостовой схеме с нереверсивной положительной обратной связью. Такие усилители отличаются высокой стабильностью. У них начальное значение тока нагрузки равно нулю.

Впервые мостовой магнитный усилитель с положительной нереверсивной обратной связью был предложен Л. П. Левиным в 1931 г. [Л. 25]. Схема усилителя приведена на рис. 5. Так как схема была предназначена реагировать на разность двух токов I_{y1} и I_{y2} , подаваемых в различные обмотки управления (w_{y1} и w_{y2}), то оказалось возможным работать без смещения (т. е. без начального подмагничивания). В схеме рис. 5 обмотки обратной связи включаются параллель-

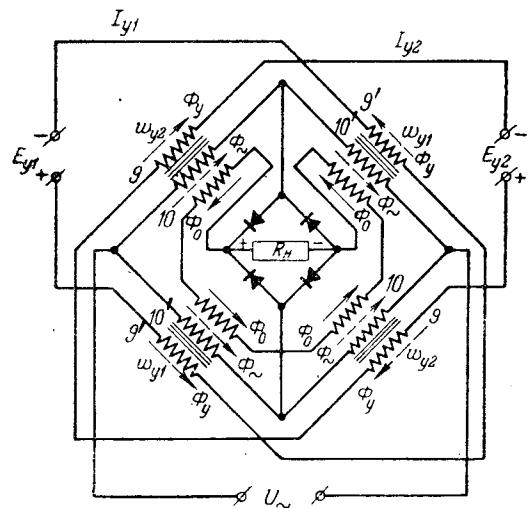


Рис. 5

но нагрузке. Л. П. Левин также предложил использовать последовательную обратную связь.

Л. П. Левин назвал предложенное им устройство «реле», подчеркивая при этом, что оно не содержит подвижных частей и контактов. Он пишет: «Усиление может быть достигнуто в любой степени, так что при малейшем изменении силы тока в регулирующих обмотках... в рабочей цепи возникает ток значительной силы, притом нечувствительной к изменению частоты источника питания». Таким образом, в изобретении Левина мы впервые находим указание о возможности применения магнитного усилителя в качестве бесконтактного реле. При этом он совершенно правильно указывает, что бесконтактное реле срабатывает только от сигналов одной полярности: «При направлении выпрямления, указанном стрелками на рис. 1 (рис. 5 нашей статьи — *M. P. и A. C.*), реле будет действовать только при уменьшении тока в обмотках 9, 9' по сравнению с обмотками 9', 9'. В обратном случае их действие будет компенсироваться» [Л. 25]. Дальнейшее развитие предложенного Л. П. Левиным магнитного усилителя и бесконтактного реле дано в другом изобретении от 1932 г. [Л. 26].

Необходимо отметить, что заграницей применение магнитного усилителя в качестве бесконтактного реле было предложено Фитцджеральдом лишь в 1934 г. [Л. 27].

В заключение еще раз отметим, что выше была рассмотрена лишь незначительная часть наиболее интересных работ, характеризующих вклад русских и советских ученых и инженеров в развитие магнитных усилителей.

Литература

1. Н. В. Рех. The Transductor, Instruments, n. 21, IV, стр. 322, 1948.
2. J. Miles. Types of magnetic amplifiers. Survey. Tr. AIEE т. 71, ч. 1, стр. 229, 1952.
3. J. Miles. Bibliography of magnetic amplifier devices and saturable reactor art. Tr. AIEE, т. 70, ч. 2, стр. 2104, 1951.
4. А. Г. Столетов. Собрание сочинений, т. I, ГИТТП, 1939.
5. А. Г. Столетов. Заметка о функции намагничивания различных железных тел. Pogg. Ann. Bd. 151; Собр. соч., т. 1.
6. М. А. Шателен. Русские электротехники второй половины XIX века. Госэнергоиздат, 1949.
7. В. П. Вологдин. Усилитель. Авторское свидетельство № 40425 от 5/IV 1934 г., кл. 21 а⁴, 2, 27.

8. Л. И. Мандельштам и Н. Д. Папалекси. Устройство для модулирования. Патент № 6018, по заявке от 22/XII 1925 г.

9. В. К. Аркадьев. Электромагнитные процессы в металлах, т. I и II, Москва, 1934 — 1936.

10. А. М. Vincent. Magnetic amplifiers — a rising star in naval electronics. Journ. Amer. Soc. Naval Engrs. т. 63, стр. 903 — 927, № 4, 1951.

11. V. D. Landon. The use of ferrite — cored coils as converter, amplifiers and oscillators. RCA Rev. т. 10, стр. 387 — 396, № 3, 1949.

12. E. H. Frost Smith. An experimental study of the magnetic amplifiers and effects of Supply frequency on performance. Journ. Brit. Inst. Radio Engrs., т 9, стр. 358 — 373, № 10, 1949.

13. А. М. Vincent. Magnetic audio — frequency fundamentals. Audio Eng., т. 36, стр. 42 — 46, 73, № 9, 1952.

14. Электромагнитный звуковой усилитель. Американский патент № 2, 657, 281, опубликованный в 1953 г. по заявке от 15/II 1950 г.

15. L. Kühn. Über ein neues radiotelephonisches system. ETZ. т. 35, ч. 29, стр. 816 — 819, 1914. Jahrbuch drahtlos. Telegr. u. Telephonie, т. 9, стр. 503 — 535, 1915.

16. E. F. W. Alexander and S. P. Nixdorff. Magnetic amplifier for radio telephony. Proc. Inst. Radio Eng., т. 4, стр. 101, 1916.

17. E. F. W. Alexander and S. P. Nixdorff. Magnetic amplifier for radio telephony. G. E. Rev., т. 19, стр. 215, № 3, 1916.

18. E. F. W. Alexander. Transoceanic radio communication. G. E. Rev., т. 23, стр. 794 — 803, № 10, 1920.

19. E. E. Buechler. The Alexanderson system for radio-communication. G. E. Rev., т. 23, стр. 813 — 819, № 10, 1920.

20. К. И. Шенфер. Устройство для усиления микрофонного тока с применением самоиндукции. Патент № 42 с приоритетом от 19/II 1920 г. кл. 21а², 18/08.

21. J. Slepian. Magnetic amplifier and selfmodulator. Американский патент № 1, 645, 302, заявлен 21/IV 1921; опубликован 11/X 1927 г.

22. М. А. Розенблат. Основы расчета двухтактных магнитных усилителей. Автоматика и телемеханика, стр. 32 — 50, № 1, 1949.

23. L. Mandelstam и Papalex. Brückenschaltung zur Modulation von Hochfrequenzströmen. Немецкий патент № 496457 по заявке от 22/IX 1927 г.

24. A. J. Sorensen. Electrical translating apparatus. U. S. pat 1, 824, 577, заявлен 7/II 1930 г., выдан 22/IX 1931 г.

25. Л. П. Левин. Реле. Авторское свидетельство № 38229 по заявке от 14/X 1931 г.

26. Л. П. Левин. Устройство для регулирования. Авторское свидетельство № 38231 по заявке от 7/IV 1932 г.

27. A. S. Fitzgerald. Magnetic amplifying and control systems. Американский патент № 2,027, 312 по заявке от 23/VII 1934 г. опубликован 7/I 1936 г.

Кандидат техн. наук М. А. РОЗЕНБЛАТ
НИИ МК СССР,
инж. А. Ф. СЕНЧЕНКОВ НИИ МРП СССР



Дискуссии

Требования к синхронным двигателям и их схемам управления и защиты

(Статья И. А. Сыромятникова, Электричество, № 5, 1953)

**Инж. С. А. МОТЫГИНА
и инж. Г. Ф. БЕЛИЧЕНКО**
г. Иркутск

И. А. Сыромятников предлагает максимально упростить схемы защиты синхронных электродвигателей и осуществлять пуск с наглухо приключенным возбудителем.

В обоснование этого предложения в настоящей статье дано описание упрощенных схем управления и защиты синхронных двигателей на водонасосной установке, предназначенной для снабжения циркуляционной водой ТЭЦ и ответственного промышленного предприятия. Водонасосная введена в эксплуатацию в 1952 г.

Синхронные электродвигатели вертикального исполнения типа ВДС 213/34-12 мощностью 1 700 квт, 6 300 в с возбудителем на одном валу типа ВВС 55/14-6 26 квт, 90 в приводят во вращение центробежные насосы типа 32В-12 производительностью 1,7 м³/сек при давлении 6,4 ати. Часть насосов, работающих для ТЭЦ, имеет уменьшенный диаметр рабочего колеса, что предусмотрено для снижения давления до 3,6 ати. Насосы снабжены обратными клапанами.

Схемой пуска и защиты синхронных электродвигателей предусматривался пуск непосредственно от сети с автоматической подачей возбуждения при уменьшении скольжения двигателя до 5%.

Двигатель был оборудован следующими видами защит, действующими на отключение: 1) максимальной защитой от перегрузки и коротких замыканий в двухфазном исполнении (реле ИТ-82); 2) защитой от выпадения из синхронизма, выполненной одним реле ИТ-82/1, выводимой из действия на время пуска двигателя блокконтактами контактора возбуждения; 3) защитой от потери тока в роторе

(реле РНТ); 4) защитой от затянувшегося пуска, выполняемой реле нулевого тока РНТ и программным реле РКП, включающим реле РНТ через 20 сек после включения выключателя электродвигателя; 5) групповой защитой минимального напряжения.

Включение электродвигателя предусматривалось только при полностью закрытой напорной задвижке у насоса. При автоматическом вводе резерва импульс одновременно подавался на включение двигателя и открытие задвижки, однако ввод резервного агрегата по такой схеме не обеспечивал сохранения требуемого давления в водоводе, так как время открытия напорных задвижек длится 1,5 ... 3,5 мин в зависимости от их типа.

Ненадежность проектной схемы выявила в первые же дни эксплуатации. Так, в аварийных условиях при пониженном напряжении в системе пуск электродвигателей не осуществлялся вследствие работы защиты контроля длительности пуска (реле РКП и РНТ). Защита от выпадения из синхронизма не работала, так как проектные установки были слишком большими: 360 а, 11 сек при токе статора в этом режиме 250 ... 330 а. В то же время при обычных пусках имели место случаи ложной работы защиты по той причине, что блокконтакт, шунтирующий обмотку токового реле, был вынесен за 100 м от места установки реле и отсос в реле оказывался достаточным для его срабатывания.

Для обеспечения максимальной надежности водоснабжения ТЭЦ особенно важен вопрос самозапуска двигателей. По проектной схеме самозапуск двигателей не обеспечивался. Исключение из схемы защиты минимального напряжения двигателя также не позволило осуществлять самозапуск, так как через 4—5 сек после исчезновения напряжения с шин двигатель отключался действием реле РНТ.

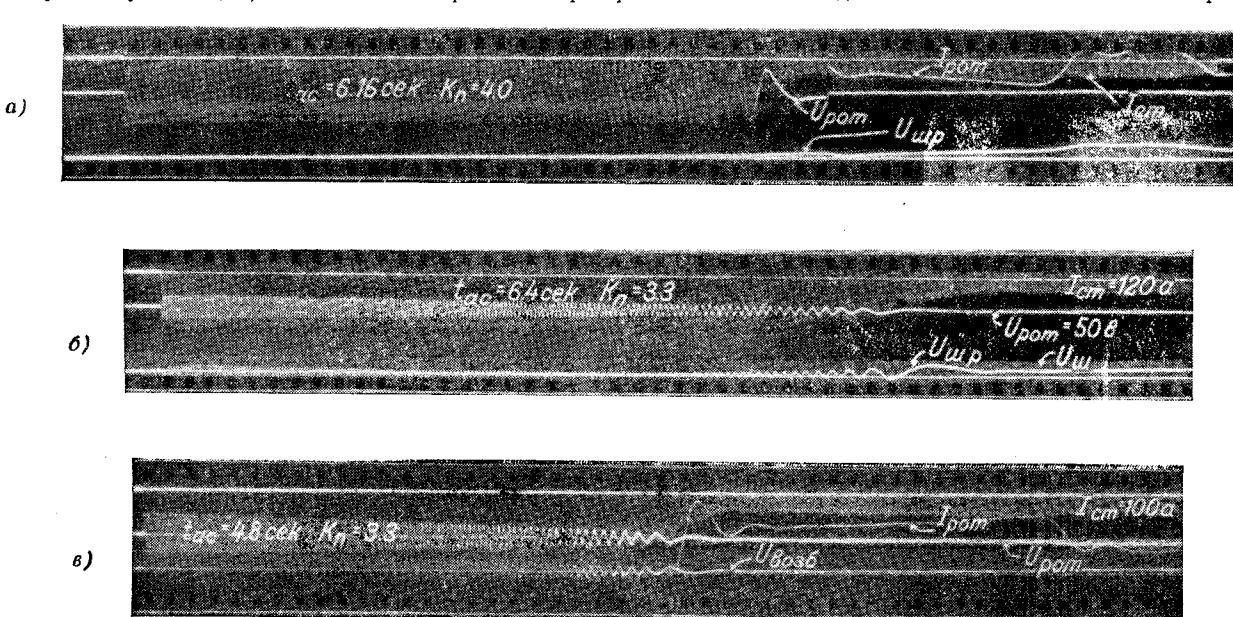


Рис. 1. Осциллограммы пуска синхронного двигателя типа ВДС 213/34-12 с насосом.
а — по проектной схеме; б — по упрощенной схеме; в — по упрощенной схеме с уменьшенным диаметром рабочего колеса насоса.

Результаты испытаний синхронного двигателя типа ВДС-234/34-12

Схема пуска	Напряжение на шинах, кв		Время асинхронного хода, сек	Ток статора в установившемся режиме, а	Мощность в установившемся режиме, квт
	до пуска	при пуске			
Проектная схема управления, задвижка насоса закрыта	6,1	5,3	6,1	95	1 200
То же, но задвижка насоса открыта	6,1	5,3	6,16	120	1 200
Возбудитель наглоуко приключен к обмотке ротора, задвижка насоса открыта	6,1	5,2	6,4	120	1 200
Проектная схема, задвижка насоса открыта, рабочее колесо насоса уменьшено	6,1	5,4	3,8	100	900
Возбудитель наглоуко приключен к обмотке ротора, задвижка насоса открыта, рабочее колесо уменьшено	6,7	5,3	4,8	100	900
То же, включение после перерыва питания с интервалом 3,9 сек	6,0	5,2	2,4	100	900
То же с перерывом питания 9,1 сек	6,0	5,2	—	100	900
То же, с перерывом питания 20 сек	6,3	5,6	3,8	100	900

В целях повышения надежности работы электродвигателей насосной тэц прежде всего была проверена возможность пуска синхронных электродвигателей при открытой напорной задвижке насоса. Проведенные испытания показали, что двигатель при этом нормально втягивается

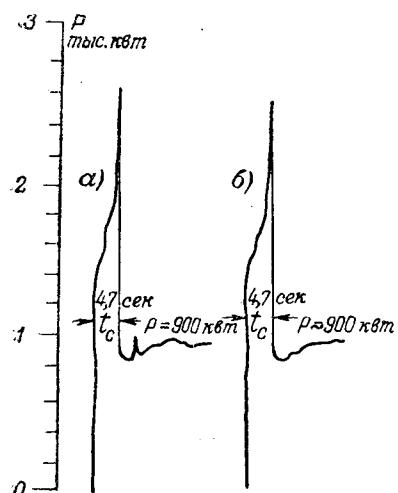


Рис. 2. Потребляемая мощность при пуске синхронного двигателя типа ВДС 213/34-12.

а — по проектной схеме; б — по упрощенной.

в синхронизм, а время асинхронного хода практически остается неизменным.

Совершенно не оказывает влияния на пуск наличие на водоводе подпора от другого работающего агрегата или незаполненного водовода. Испытания показали, что

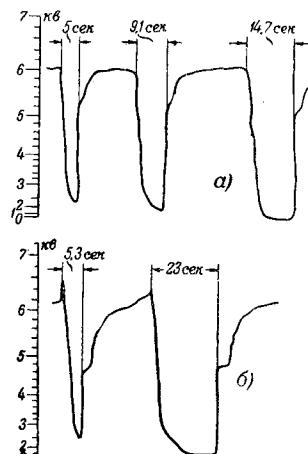


Рис. 3. Изменение напряжения на шинах подстанции при самозапуске двигателей с наглоуко приключенными возбудителями.

а — одного двигателя с перерывами 5; 9,1 и 14,7 сек; б — двух двигателей с перерывами 5,3 и 23 сек.

схемой АВР должна быть предусмотрена открытая задвижка у резервного насоса.

В целях дальнейшего упрощения схемы электродвигатели включались в сеть с наглоуко приключенными возбудителями и открытой задвижкой насоса. Мощность, потребляемая из сети, в конце пуска составляла 1 200 квт при нормальном рабочем колесе насоса и 900 квт — при уменьшении.

Пуск электродвигателей с наглоуко приключенными возбудителями при открытой задвижке происходит без резких толчков, плавно. Общее время асинхронного хода увеличивается на 10...20% по сравнению с пуском по схеме с обмоткой ротора, замкнутой на гасительное сопротивление. Кратность пускового тока практически не изменяется. Сопоставление осциллограмм пуска по проектной и упрощенной схемам дано на рис. 1. Во всех 80 произведенных пусках электродвигатели надежно втягивались в синхронизм.

Результаты обработки осциллограмм пусков приведены в таблице.

Во время испытаний также регистрировалась потребляемая мощность двигателя. На рис. 2 приведены кривые потребляемой мощности при пуске по проектной (рис. 2, а) и упрощенной схемам. Кривые показывают, что пуск электродвигателей с наглоуко приключенными возбудителями происходит без качаний мощности при входении в синхронизм, наблюдавшихся по проектной схеме после подачи возбуждения при пуске.

В случае пуска двигателя с наглоуко приключенными возбудителями процесс втягивания в синхронизм происходит более плавно.

Решение технического совета ГПИ Тяжпромэлектропроекта от 28 мая 1953 г. подчеркивает необходимость широкого внедрения во всех отраслях народного хозяйства синхронных двигателей. В свете этого решения особую актуальность приобретает вопрос о самозапуске синхронных электродвигателей, недостаточно освещенный в технической литературе. Внедрение самозапуска для всех ответ-

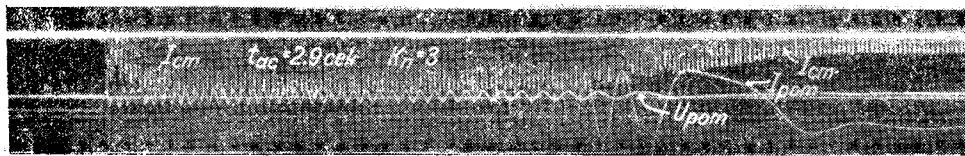
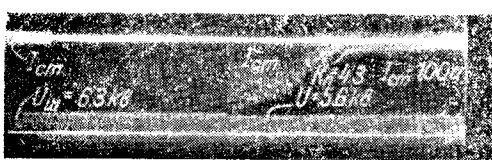


Рис. 4. Самозапуск синхронных двигателей типа ВДС 213/34-12 при различных перерывах питания.

ственных механизмов позволит в значительной мере повысить надежность работы привода в аварийных режимах.

Самозапуску синхронных электродвигателей с наглухо приключенным возбудителем свойственны некоторые особенности:

1. После отключения источника питания синхронные электродвигатели, продолжая по инерции вращаться, генерируют переменное напряжение, уменьшающееся по мере снижения скорости двигателя.

2. При восстановлении напряжения получается режим наложения двух разных по величине, фазе и частоте напряжений, что может вызвать несколько увеличенный бросок тока статора в начальный момент.

3. Чем быстрее осуществляется самозапуск электродвигателей, тем больше возможен бросок тока статора при расхождении напряжений по фазе, но тем быстрее двигатель втягивается в синхронизм.

Запись напряжения на шинах при самозапуске одного и самозапуске двух двигателей дана на рис. 3. Напряжение двигателя до значения $0,5 U_n$ снижается за время, меньшее чем 2 сек.

На рис. 4 приведены осциллограммы самозапуска двигателя через 3,9 и 5 сек, а на рис. 5 — запись мощности при самозапуске с перерывом питания 5 и 10 сек.

Напряжение на шинах в момент самозапуска одного двигателя понижается в среднем до 86% номинального (так же, как и при пуске), при самозапуске двух двигателей — до 76%. Во всех случаях двигатели устойчиво втягиваются в синхронизм.

На основании произведенных испытаний схема пуска и защиты была пересмотрена (рис. 6). Предусмотрен пуск с наглухо приключенным возбудителем. На отключение двигателя действуют только аварийная кнопка и защита от перегрузки и коротких замыканий, выполненная реле ИТ-82/2А в двухфазном исполнении¹.

Уставка защиты от перегрузки снижена до 115% номинального тока, с тем чтобы она реагировала на выпа-

¹ АГП оставлено, но отключение его предусмотрено только от защиты или аварийной кнопки.

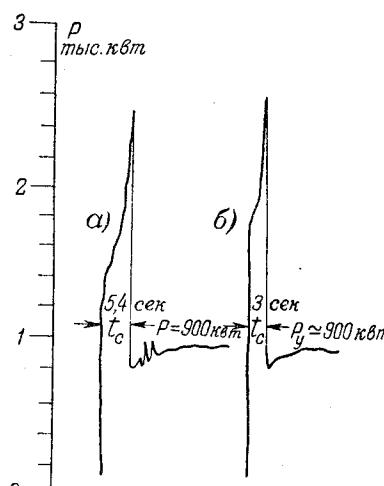


Рис. 5. Потребляемая мощность при самозапуске.

При перерыве питания 5 сек (а) и 10 сек (б).

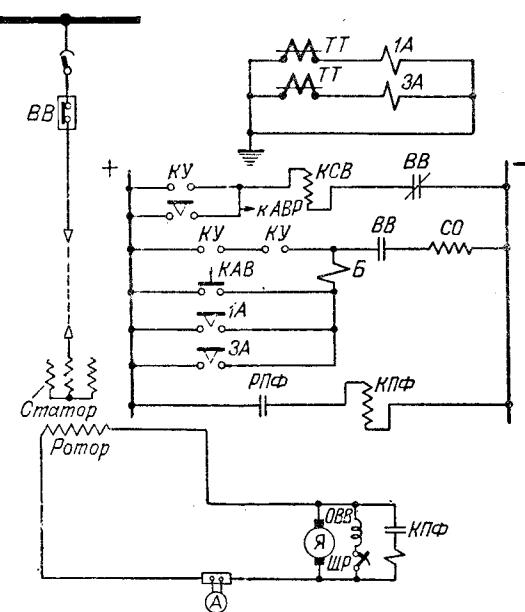


Рис. 6. Внедренная схема пуска и защиты синхронного двигателя.

дение двигателя из синхронизма в случае потери возбуждения. Уставки максимальной отсечки повышены на 20% для более надежной отстройки защиты от бросков пускового тока двигателей при самозапуске. Сохраняется групповая форсировка возбуждения, действующая при понижении напряжения ниже 85% номинального. Остальные защиты из схемы исключены.

Пять месяцев эксплуатации электродвигателей по описанной схеме пуска и защиты показали исключительную надежность схемы.

Выводы. 1. Для мощных центробежных насосов типа 32В-12 с двигателями типа ВДС 213/34-12 пуск должен осуществляться с наглухо приключенным возбудителем, а в случае применения обратных клапанов — и при открытой задвижке у насоса.

2. Для всех ответственных синхронных электродвигателей, допускающих пуск под нагрузкой, необходимо широко внедрять самозапуск.

3. При проектировании синхронных электродвигателей подобного назначения необходимо вообще отказаться от магнитных станций, осуществляя глухое подключение возбудителей к ротору.

Новая схема и конструкция распределустройства электростанции

(Статья Л. И. Двоскина, Электричество, № 11, 1953)

Кандидат техн. наук Б. И. РОЗЕНБЕРГ

Ленинградский политехнический институт
им. Калинина

Предложенная Л. И. Двоскиным схема вряд ли может быть признана приемлемой, так как она обладает рядом серьезных недостатков.

В первую очередь следует поставить под сомнение целесообразность применения сдвоенных групповых реакторов в том виде, как они показаны на схеме рис. 5 рассматриваемой статьи. Предварительно, однако, необходимо внести некоторые корректировки в цифровые данные, приводимые Л. И. Двоскиным.

Нетрудно видеть, что при нагрузке каждого группового реактора 2 000 а, величина номинального тока каждой половины 1 500 а является недостаточной. Действительно, если даже предположить, что нагрузка 2 000 а делится точно пополам между обеими сборками, но учесть, что каждая из них имеет в своем составе резервные, нормально ненагруженные цепи, в том числе и 600-амперные, то при отключении какой-либо рабочей цепи, питаемой от другой секции, и необходимости, следовательно, использовать резерв, величина тока станет равной 1 600 а, т. е. превысит 1 500 а.

Однако предположение о точном делении нагрузки пополам является нереальным. Помимо того, нагрузка может вообще превысить 2 000 а, что невозможно предвидеть

заранее. Поэтому ток каждой из половин реактора может быть еще большим. Следовательно, номинальный ток каждой из них должен быть не меньше 2 000 а, а реактивное сопротивление должно быть увеличено с 10%, отнесенных к току 1 500 а, до 13,5%, отнесенных к току 2 000 а.

При коэффициенте связи сдвоенного реактора 0,5 и одинаковой нагрузке на обеих его половинах потеря напряжения в сдвоенном реакторе 2×1500 а, 10% или 2×2000 а, 13,5% будет не в 8, а только в 4 раза меньше, чем в одиночном реакторе 3 000 а, 20%. Однако в реальных условиях приходится считаться с весьма большой неравномерностью нагрузки.

К сборкам, которые питаются от одного группового реактора, нецелесообразно присоединять линии, идущие к одному потребителю. Эти линии целесообразно распределить между разными групповыми реакторами. Таким образом, к одному реактору должны присоединяться разные потребители, работающие и в три, и в две смены, имеющие несовпадающие часы начала и конца работы, а также обеденные перерывы и различные коэффициенты мощности. В их составе могут быть мощные, периодически включаемые приемники, например прокатные станы. Нетрудно убедиться, что при этих условиях с колебаниями напряжения дело будет обстоять далеко не так благополучно, в особенности при необходимости использовать на более нагруженной сборке одну из резервных цепей.

Примем, что в какой-то час суток одна сборка загружена током 1 500 а, а другая — 500 а. Предположим, что у всех потребителей $\cos \varphi = 0,8$, а напряжение на главных шинах — 100%. Тогда напряжение на первой сборке, где нагрузка составляет 1 500 а, получится равным

$$U_1 = 100 - \left(\frac{1500}{2000} - 0,5 \frac{500}{2000} \right) 0,6 \cdot 13,5 = 95\%,$$

т. е. будет на 5% ниже, чем на главных шинах. Напряжение на второй сборке, где нагрузка составляет только 500 а,

$$U_2 = 100 - \left(\frac{500}{2000} - 0,5 \frac{1500}{2000} \right) 0,6 \cdot 13,5 = 101\%,$$

т. е. будет на 1% выше, чем на главных шинах. В результате разница в величинах напряжения составит 5+1=6%. Аналогичная картина получится, если предположить, что потребители, присоединенные к одной из сборок, имеют более высокий коэффициент мощности.

Сделанные предположения не являются невероятными. Скорее наоборот, они не отражают всего того, что может иметь место в эксплуатации. Например, приведенные цифры получены, исходя из среднечасовой нагрузки, в то время как фактические графики нагрузок в большинстве случаев имеют «зубчатый» характер, причем кратковременные подъемы и провалы нагрузок отдельных сборок не совпадают по времени. Ввиду этого фактический диапазон колебаний напряжения в приведенном примере будет еще большим.

Реальные границы этого диапазона определить весьма трудно. Можно только констатировать, что при типовой схеме и реакторах 600 а 6%-ный диапазон колебаний напряжения от холостого хода до полной нагрузки теоретически определяется величиной 3,6% ($\sin \varphi = 0,6$), а при сдвоенном групповом реакторе 2×2000 а, 13,5% — величиной 12% (полная загрузка одной половины и почти холостой ход второй). Ожидать таких диапазонов на практике нельзя, но можно полагать, что если при типовой схеме реальный диапазон должен составлять 2...3%, то при схеме со сдвоенным групповым реактором он может достигать 7...8%.

Изложенное показывает, что с точки зрения колебаний напряжения предлагаемая схема не только уступает типовой, но и является мало приемлемой. Недостаточно приемлема она и по другим соображениям.

Схемы электрических соединений нельзя рассматривать и оценивать по их стабильному состоянию. Известно, что тепловые электростанции не сооружаются сразу на конечную мощность, а развиваются этапами, причем весьма часто они выходят за пределы своей проектной мощности. Если подойти к оценке предлагаемой схемы с этой точки зрения, то можно видеть, что она существенно уступает типовой.

Предположим, что согласно проекту на электростанции должны быть установлены не три, а только два генератора. Тогда при наличии только двух групповых реакторов с указанными выше параметрами нельзя произвести ревизию одного из них путем перевода питания на другой. Действительно, нагрузка оставшегося в работе реактора поднимется до 4 000 а. Но так как равномерное распределение ее между половинами реактора невозможно, то номинальный ток 2 000 а для каждой половины окажется недостаточным. Непригодными окажутся и намеченные для цепей групповых реакторов выключатели типа МГГ-10, изготавляемые на токи до 3 000 а.

Так как отключение значительной части потребителей недопустимо, то из этого положения могут быть два выхода: либо применение еще более тяжелой аппаратуры (выключателей МГГ-229 и групповых реакторов 2×3000 а, 20%), либо увеличение числа групповых реакторов. Второй путь является более правильным как вследствие технических затруднений, которые должны возникнуть при изготовлении сдвоенных реакторов на большие токи, так и вследствие больших колебаний напряжения, которые будут иметь место при их применении. Он более правилен и с точки зрения возможности расширения станции. Действительно, если пойти по первому пути, то пришлось бы создавать две секции и устанавливать тяжелое оборудование одновременно с пуском первого агрегата. Кроме того, предусматривая в цепях групповых реакторов аппаратуру на 4 000 а, легко ошибиться, так как в дальнейшем нагрузка может оказаться равной не 4 000, а 4 500 или 5 000 а.

Следовательно, если по проекту намечается установить два агрегата, то в схеме следует предусмотреть не два, а четыре групповых реактора. При необходимости же установить в дальнейшем третий агрегат переход к более тяжелой аппаратуре не будет иметь смысла, поэтому к третьей секции придется присоединить еще два групповых реактора. Таким образом, при реальном подходе к осуществлению схемы с групповыми реакторами необходимо предусматривать по два групповых реактора на секцию. Тогда при питании через каждый реактор двух сборок могут устанавливаться реакторы 2×1500 а, 10% и выключатели типа МГГ-10.

Однако схема с двумя групповыми реакторами на секцию потребует более значительных затрат, чем типовая.

Следует отметить, что сопоставление затрат при сравнении типовой схемы с предлагаемой производится Л. И. Двоскиным не совсем правильно. Л. И. Двоскин не учитывает увеличения затрат, связанного с увеличением тока короткого замыкания в потребительских сетях. Он ссылается на работу Северо-западного отделения Теплоэлектропроекта [А. 1], в которой доказывается, что указанное увеличение затрат перекрывается удешевлением распределительного устройства. Но это верно лишь при условии, если схема остается прежней, а не усложняется созданием групповых цепей и удвоением количества линейных выключателей, если появляется возможность применить комплектные распределительные устройства (КРУ), устанавливаемые в одноэтажном, а не в трехэтажном здании. Надо полагать, что даже при схеме с одним групповым реактором на секцию полный учет всех затрат, в том числе затрат на дорогие быстродействующие защиты, должен привести к весьма небольшим экономическим преимуществам этой схемы. Что же касается схемы с двумя групповыми реакторами на секцию, то она будет значительно дороже типовой схемы. Кроме того, Л. И. Двоскин сравнивает весьма «богатую» типовую схему (с выключателями, шунтирующими реакторы, без которых можно обойтись; с выключателями типа МГГ-10 на линиях, хотя согласно руководящим указаниям по токам короткого замыкания возможна установка выключателей типа ВМГ-133) с весьма «бедной» схемой (без выключателей на отпайках генераторов, с групповыми реакторами недостаточной пропускной способности), которую он предлагает.

Конструктивное оформление схемы, предлагаемой Л. И. Двоскиным, должно также встретить серьезные затруднения. Установка наиболее тяжелых аппаратов, какими являются реакторы, во втором этаже является нежелательной. При увеличении числа групповых реакторов окажется, что второй этаж должен иметь большие-

размеры, чем первый и третий, и, следовательно, здание распределительного устройства будет плохо использовано.

Таким образом, схема с одним групповым реактором на секцию неприемлема как с точки зрения колебаний напряжения, так и с точки зрения реальных условий роста нагрузки и развития электростанций. Схема же с двумя групповыми реакторами на секцию сложна и требует больших затрат, чем типовая. При этом усложнение схемы и значительное увеличение числа аппаратов не только не создают каких-либо дополнительных преимуществ, а наоборот, ведут к уменьшению эксплуатационных удобств.

Отказ от двойной системы шин на электростанциях следует признать неправильным. Преимущества двойной системы шин заключаются не только в том, что при авариях на шинах имеется возможность в короткий срок восстановить нормальное электроснабжение и без его перерыва осуществить профилактический ремонт шин и шинных разъединителей; при двойной системе шин имеется возможность плавно поднимать напряжение от нуля при испытаниях какого-либо элемента сети, получать на второй системе шин напряжение, отличное от того, при котором нормально осуществляется питание потребителей, присоединять к ней отпайки от генераторов, включенных в блок с трансформаторами, и таким образом, при выходе в ремонт любого из генераторов, присоединенных к сборным шинам, осуществлять питание потребителей генераторного напряжения, не прибегая к двойной трансформации. При ремонте агрегатов двойная система шин позволяет перебрасывать нагрузку с одной секции на другую, что в предлагаемой Л. И. Двоскиным схеме можно сделать только при наличии линий без резерва (при двух выключателях на цепь). Если же имеется сетевой резерв, например имеются две линии,

нормально загруженные наполовину, то перераспределение мощности возможно лишь путем отключения части цепей, т. е. путем понижения надежности и экономичности электроснабжения. Число таких примеров может быть умножено.

В силу изложенного типовая схема с двойной системой шин при всей простоте своей структуры является более гибкой, чем предлагаемая. Следует считать ее и более надежной в эксплуатации. Создание всякого рода промежуточных сборок и неизбежное при этом увеличение числа выключателей, измерительных трансформаторов и защит всегда ведет к понижению надежности электроснабжения и утяжелению условий работы эксплуатационного персонала.

Стремление Л. И. Двоскина расширить область применения КРУ правильно, и всякие попытки такого рода надо приветствовать. Неправильно, однако, применение КРУ оплачивать слишком дорогой ценой. Необходимо, чтобы рациональная схема органически сочеталась с рациональной конструкцией и чтобы не было натяжек ни с той, ни с другой стороны. В данном случае этого не получилось. Поэтому предлагаемое решение вопроса не может быть одобрено. Однако Л. И. Двоскин не должен оставлять попыток получить действительно удачное комплексное решение поставленной им задачи.

Литература

1. Н. Г. Быков и Б. И. Розенберг. Возможность отказа от реактирования питающих линий при применении у потребителей выключателей ВМГ. Электрические станции, № 9, 1949.

Определение экономической плотности тока в кабельной сети

(Статья В. М. Дмитриева, Электричество, № 10, 1953)

Профессор П. Г. ГРУДИНСКИЙ
Московский энергетический институт
им. Молотова

При проектировании новой электрической линии возникает задача: как выбрать сечение ее проводов, чтобы передача энергии при заданном максимальном токе нагрузки была наиболее экономичной? Плотность тока, получающуюся из этих условий, принято называть экономической. При определении этой плотности принимается, что ток в линии в максимум нагрузки не изменяется; сечение же проводов может меняться.

В. М. Дмитриев предлагает решать эту задачу другим методом; он предлагает считать сечение проводов заданным и определять максимальный ток, при котором стоимость передачи 1 квач будет наименьшей. Плотность тока, найденную из этих условий, автор называет «экономической». Автор считает, что предлагаемая им методика более приемлема, чем та, которой пользовались до сих пор, а выведенная на основе этой методики формула ему «представляется наиболее законченной», так как в ней «учтены все факторы, влияющие на экономику передачи электрической энергии».

Преимущество «новой» методики определения экономической плотности тока В. М. Дмитриев видит в том, что она «исходит из минимума расходов на единицу продукции», общепринятый же метод будто бы не удовлетворяет этому условию. Цель настоящей заметки — показать ошибочность этого утверждения автора, а вместе с тем и глубокую ошибочность предлагаемого метода.

Напишем выражение стоимости передачи 1 квач в рублях в зависимости от тока в максимум нагрузки I_m и

сечения проводов s , пользуясь теми же обозначениями, какие приняты в рассматриваемой статье:

$$C_1 = \frac{k_x p' \cdot 10^{-2} + 3I_m^2 \tau \beta \rho l \cdot 10^{-3} + (a + bs) pl \cdot 10^{-2}}{\sqrt{3} UI_m T}. \quad (1)$$

Выражение (1) имеет примерно тот же вид, что и уравнение (8) в статье В. М. Дмитриева.

Решение относительно $\frac{I_m}{s} = j_c$ уравнения, полученного в результате дифференцирования выражения (1) по s при постоянном I_m и приравнивания производной нулю, дает общепринятое выражение для экономической плотности тока, аналогичное формуле Кельвина-Шухова:

$$j_c = \sqrt{\frac{10 bp}{3 \tau \beta \rho}}. \quad (2)$$

Решение же относительно $\frac{I_m}{s}$ уравнения, полученного в результате дифференцирования выражения (1) по I_m при постоянном s и приравнивания производной нулю, дает выражение, предложенное В. М. Дмитриевым для определения плотности тока, при котором стоимость передачи 1 квач для кабеля данного сечения имеет минимум:

$$j'_c = \sqrt{\frac{10 bp + 10 \left(\frac{k_x p'}{ls} + \frac{pa}{s} \right)}{3 \tau \beta \rho}}. \quad (3)$$

Это выражение в рассматриваемой статье обозначено (9). Таким образом, оба выражения, и общепринятое, и предложенное В. М. Дмитриевым, — отвечают условию минимума стоимости передачи 1 квач: выражение (2) — при заданном токе линии в максимум, выражение (3) — при заданном сечении проводов.

Легко показать, что экономическая плотность тока может и должна определяться при условиях, когда ток задан, а сечение проводников выбирается. Для этого достаточно представить выражение (1) графически для разных сечений кабеля при изменяющейся нагрузке, что и сделано на рис. 1. Точки, соответствующие выражениям (2) и (3), отмечены на этом рисунке цифрами 2 и 3.

Из рис. 1 видно, что режимы, отвечающие выражению (2), лежат на огибающей характеристике всех возможных режимов передачи энергии и действительно соответствуют условию минимума эксплуатационных расходов на 1 квач при заданном максимальном токе.

Из того же рис. 1 видно, что нет оснований считать режимы, определяемые выражением (3), в какой-либо степени экономичными. Хотя для данного кабеля по выражению (3) можно определить, при каком токе стоимость передачи энергии имеет минимум, но существует ряд больших сечений кабеля, при которых стоимость передачи энергии при том же максимальном токе будет еще меньше. Поэтому предложенное В. М. Дмитриевым выражение (3) не может быть принято как исходное для определения экономической плотности тока при выборе сечения проводов новой линии.

Более того, определение минимума стоимости передачи 1 квач для кабеля заданного сечения не имеет никакого практического значения и не может дать каких-либо руководящих указаний для эксплуатации. Если ток нагрузки уже проложенного кабеля возрастет и достигнет величины, соответствующей минимуму стоимости передачи 1 квач, то недопустимо принимать какие-либо меры к тому, чтобы остановиться на достигнутом режиме, так как это означало бы ограничение роста нагрузки, а следовательно, неиспользование средств, вложенных в установки потребителей. Убытки народного хозяйства от таких ограничений

во много раз превзойдут экономию на передаче электрической энергии. Поэтому совершенно недопустимо определять экономичный режим системы станция — основная сеть системы — кабель — потребитель на основе экономичного режима только одного и при том далеко не решающего звена, каким является кабель.

С. А. Кукель-Краевский показал, что определять сечение проводов из условия минимума расхода представляется нецелесообразным и предложил ввести в формулу (2) поправку на срок окупаемости. При этом формула для определения экономической плотности тока принимала вид:

$$\frac{I_m}{s_3} = j_3 = \sqrt{\frac{10b \left(\frac{100}{T_0} + p \right)}{3p \left(\frac{k_a}{T_0} + \tau \beta \right)}}. \quad (4)$$

Легко видеть, что при $T_0 = \infty$ выражение (4) превращается в выражение (2). В несколько ином виде выражение (4) приводится в пособиях для вузов [Л. 1]. Комиссия, подготовлявшая проект действующих норм экономической плотности тока, внесла в выражение (4) ряд коэффициентов, учитывающих несовпадение максимумов нагрузки системы и станции, ступенчатость шкалы сечений проводов, наличие резервов в сети, зависимость стоимости потерь энергии от времени потерь и т. д. В статье В. М. Дмитриева выражение (4) имеет порядковый номер (7) и приводится без учета этих факторов.

В. М. Дмитриев вносит аналогичную поправку на срок окупаемости и в выражение (3) и получает выражение, обозначенное им (12). На рис. 1 соответствующие точки отмечены этой цифрой. Однако внесение поправки не изменяет сути дела, так как на режиме (12) так же нельзя останавливаться, как и на режиме (10). Стоимость передачи 1 квач измеряется долями копейки, и замораживать неизмеримо большие средства, заложенные в предприятии, питающемся по кабелю, путем ограничения его нагрузки с народнохозяйственной точки недопустимо. Таким образом, практического значения выражение (12), как и выражение (10), не имеет.

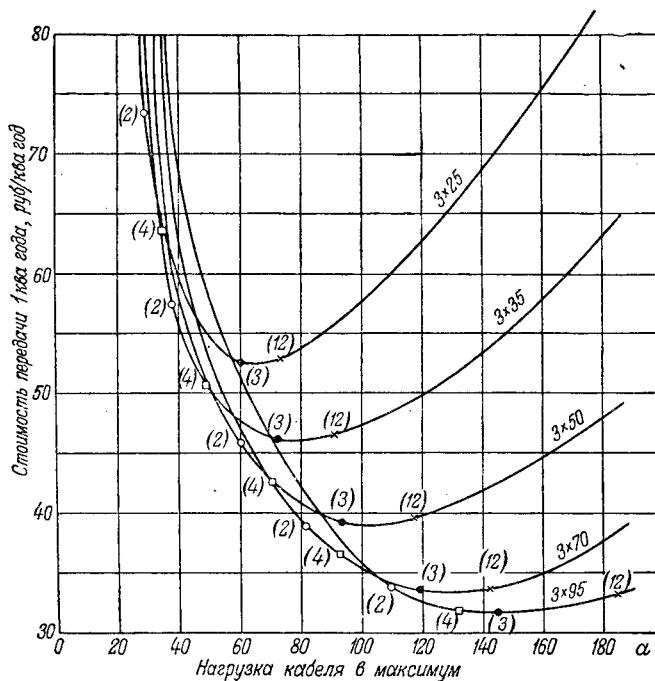
Б. И. Розенберг дал иной критерий предельной плотности тока при увеличении нагрузки кабеля. Он показал, что экономически целесообразно нагружать проложенный кабель до такой плотности тока, при которой затраты на прокладку дополнительного кабеля окупаются снижением эксплуатационных расходов [Л. 2]. Им же доказано, что сечения дополнительного и работающего кабелей должны удовлетворять требованию обеспечения в них экономической плотности тока.

К сожалению, Б. И. Розенберг вывел свои выражения без учета срока окупаемости. Если в его формулу внести соответствующую поправку, она примет вид:

$$j_{np} = j_3 \left[1 + \sqrt{\frac{a_2 I_2 \left(\frac{100}{T_0} + p \right) + k_{a2} \left(\frac{100}{T_0} + p' \right)}{s_1 b_2 I_2 \left(\frac{100}{T_0} + p \right)}} \right]. \quad (5)$$

Здесь под j_3 подразумевается экономическая плотность тока, вычисляемая по выражению типа (4). Индексами 2 обозначены постоянные, относящиеся к дополнительному кабелю. Предельная плотность тока, определяемая по выражению (5), примерно вдвое больше экономической. Выражение (5) показывает также, как важно при проектировании правильно оценить будущую нагрузку кабеля и правильно выбрать его сечение. Исправление допущенной ошибки потребует дополнительных средств, которые часто не окупаются уменьшением эксплуатационных расходов, так как для кабелей большого сечения плотность тока по нагреву будет достигнута раньше предельной, при которой целесообразна прокладка дополнительного кабеля.

Подводя итоги сказанному, следует прийти к выводу, что методика, предложенная В. М. Дмитриевым, непригодна ни для выбора сечений вновь прокладываемых кабелей.



Зависимость стоимости передачи 1 квач в год от загрузки кабеля в максимум нагрузки при числе часов использования максимума 4 000.

Точки, отмеченные на кривых, соответствуют: 2 — минимуму стоимости передачи 1 квач года при заданном токе в кабеле; 3 — минимуму стоимости передачи 1 квач года для кабеля данного сечения по формуле (10) рассматриваемой статьи; 4 — экономической плотности тока по методу Кукель-Краевского; 12 — режиму, определяемому по формуле (12) рассматриваемой статьи.

лей, ни для определения той нагрузки, при которой целесообразна прокладка дополнительного кабеля. Вычислять плотности тока по предложенным им выражениям (10) и (12) бесполезно, так как в эксплуатации нет иных средств поддерживать такой режим, кроме ограничения нагрузки потребителей. Практиковать же такое ограничение недопустимо с народнохозяйственной точки зрения.

Следует пожалеть, что В. М. Дмитриев опубликовал статью, которая вводит читателей в заблуждение. Между тем внесение ясности в вопрос об установлении методики определения экономической плотности тока становится актуальным ввиду необходимости подготовиться к неизбежному пересмотру норм.

Литература

1. С. Ф. Шершов. Методы технико-экономических расчетов. МЭИ, 1950.
2. Б. И. Розенберг. Экономическая целесообразность строительства дополнительных линий в электрических сетях. Электрические станции, № 9, 1951.

Инж. Е. Н. ПРИКЛОНСКИЙ

Государственный институт азотной промышленности

Способ, предложенный В. М. Дмитриевым для определения экономической плотности тока, математически неправлен. В. М. Дмитриев углубляет математическую ошибку, допущенную Д. С. Лившицем [Л. 1]. Эта ошибка состоит в том, что при нахождении минимума суммарных затрат, являющихся функцией искомого сечения, дифференцирование производится по заданному току, в то время как последний не является аргументом дифференцируемой функции.

Практически нас интересуют экономические сечения; их мы должны или выбирать, или заменять, или увеличивать. Но какая бы из этих трех задач перед нами ни стояла, решение должно быть одним и тем же, так как все другие решения дадут перерасход средств. Из того обстоятельства, что искомое нами решение удобно выражать через экономическую плотность тока, не следует делать ошибочного вывода, будто нас интересует какой-то «экономический ток». Ток должен рассматриваться, как заданная величина.

Однако возможна другая задача, которая состоит в нахождении такого тока существующей линии, по достижении которого может быть оправдано возвращение к экономической плотности тока, несмотря на необходимость дополнительных затрат на реконструкцию линии. Эта задача, если ее поставить правильно, решается иначе. Для ее решения зависящие от тока суммарные затраты, имеющие место при существующем сечении линии, следует приравнять к суммарным затратам, которые будут иметь место после реконструкции линии, т. е. при экономической плотности тока. Никакого дифференцирования по току при постоянном сечении в данном случае не требуется, так как сечение заменяемого или добавляемого проводника является искомым. Таким образом, методы, предложенные В. М. Дмитриевым и Д. С. Лившицем, не пригодны для решения и этой задачи.

Сечение допустимо считать постоянным только в том случае, если замена проводов линии или увеличение их числа невозможно. Однако такой случай практически мало вероятен. Но и в этом случае нельзя допускать узкоместнической оценки затрат, их анализ должен быть произведен всесторонне, с общей народнохозяйственной точки зрения. Было бы ошибкой, если бы мы интересовались лишь максимальным использованием тех постоянных затрат, которые скрыты в стоимости провода, как это делает, например, Д. С. Лившиц. Было бы также совершенно недостаточным, если бы, кроме этого, мы интересовались лишь более полным использованием затрат на прокладку провода (траншеи, блоки, туннели), а также затрат на коммутационную аппаратуру, установленную на обоих кон-

цах линии, как это, например, делает В. М. Дмитриев. Необходимо интересоваться наиболее полным использованием и других значительных по величине составляющих затрат, которые сохраняются неизменными и которые, следовательно, по мере роста передаваемого тока ложатся меньшей величиной на 1 а. Например, увеличение передаваемого тока на участке кабельной линии между повысительной и понизительной подстанциями приведет к более полному использованию затрат на строительство и оборудование подстанций (аккумуляторные батареи, шинноединительные выключатели, сигнализацию, автоматическое включение резерва, телефонную связь, лестничные клетки, подъездные пути, земельно-планировочные работы и т. д.).

Задача экономического обоснования увеличения плотности тока может представлять интерес в тех случаях, когда, например, требуется обеспечить более полное использование мощности генераторов электростанций или когда необходимо оживить уже произведенные потребителем затраты, которые в противном случае омертвляются. Но из сказанного видно, что эта задача не может решаться теми способами, которые предлагают Д. С. Лившиц и В. М. Дмитриев.

Затраты, связанные с передачей электроэнергии, можно разбить на три группы:

1) затраты на проводники, зависящие от сечения,

$$A_n = f(s);$$

2) затраты на потери электроэнергии в проводниках, зависящие от максимальной мощности потерь,

$$A_s = \varphi(P);$$

3) затраты A_0 , которые не зависят от сечения выбранного кабеля. В величину A_0 входят затраты на прокладку кабеля (траншеи, блоки, туннели), на коммутационную аппаратуру, расположенную на концах линии, на выработку и передачу полезной электроэнергии к потребителю, на электротехнические и технологические устройства, которые питаются электроэнергией по данному кабелю, и т. д.

Если ток принимается заданным, а сечение изменяется, то независимые от сечения затраты A_0 ложатся постоянной величиной на все сравниваемые варианты и не могут влиять на решение вопроса. Благоприятным фактором в данном случае является то, что известны и величина тока, и характер его изменения в течение года или более длительного периода. Если же ток не задан, а принимается в качестве переменной величины, то затраты A_0 не постоянны. В этом случае требуется выявление характера функциональной зависимости $A_0 = \Phi(I)$, что является сложной задачей, которую упустили из виду Д. С. Лившиц и В. М. Дмитриев.

Таким образом, сумма затрат

$$\Sigma C = f(s) + \varphi(P) + A_0. \quad (1)$$

После дифференцирования выражения (1) по s получим:

$$\frac{d\Sigma C}{ds} = \frac{df(s)}{ds} + \frac{d\varphi(P)}{ds} + \frac{dA_0}{ds}. \quad (2)$$

Последний член правой части уравнения (2) равен нулю, так как он является производной от постоянной, независимой величины.

Умножив и разделив второй член правой части уравнения (2) на dP и приравняв сумму первого и второго членов нулю, получим условие минимума:

$$\frac{df(s)}{ds} + \frac{d\varphi(P)}{dP} \frac{dP}{ds} = 0. \quad (3)$$

Максимальная мощность потерь в проводнике

$$P = ml_p \frac{I^2}{s}, \quad (4)$$

следовательно,

$$\frac{dP}{ds} = - ml_p \frac{I^2}{s^2}. \quad (5)$$

Введем обозначения:

$$b' = \frac{1}{ml} \frac{df(s)}{ds}, \quad (6)$$

$$B'_0 = \frac{d\varphi(P)}{dP}. \quad (7)$$

Тогда

$$j = \frac{I}{s} \sqrt{\frac{b'}{\mu B'}}. \quad (8)$$

Как видно из выражения (8), экономическая плотность тока зависит от соотношения величин b' и B' . Первая из этих величин представляет собой нарастание затрат на провода при увеличении сечения, а вторая — нарастание затрат в энергосистеме при увеличении максимальной мощности потерь.

Не зависящие от сечения постоянные составляющие затрат на провода исключаются путем дифференцирования. Примем, что затраты на провода при сечении s_1 составят A_{n1} , а при сечении $s_2 - A_{n2}$, тогда

$$b' = \frac{1}{ml} \frac{A_{n2} - A_{n1}}{s_2 - s_1}.$$

Если зависимость затрат на провода от сечения принимается прямолинейной, то

$$b' = \frac{1}{ml} \frac{(a + bs_2) - (a + bs_1)}{s_2 - s_1} = \frac{b}{ml}.$$

Из сказанного следует, что экономическая плотность тока не зависит от числа жил кабеля и его длины. С увеличением числа жил или длины кабеля скорость нарастания затрат на кабель и на потери в нем в связи с ростом сечения остается неизменной, а следовательно, остается неизменной и экономическая плотность тока. Этим подтверждается несостоительность формулы В. М. Дмитриева, которая при длинах, близких к нулю, дает бесконечно большие плотности тока.

Выражение (7) показывает, что при определении экономической плотности тока нас должны интересовать не средние затраты на 1 квтч, а нарастание затрат по мере роста мощности потерь. Тарифная стоимость или себестоимость определяется из соотношения $\frac{A_\varphi}{P}$, нас же должна интересовать другая, неравная ей, величина:

$$\frac{d\varphi(P)}{dP} \approx \frac{A_\varphi - A_{\varphi 1}}{P_2 - P_1} = \frac{\Delta A_\varphi}{\Delta P},$$

где $A_{\varphi 1}$ — затраты при мощности потерь P_1 , а $A_{\varphi 2}$ — при мощности потерь P_2 . Нарастание затрат ΔA_φ соответствует нарастанию мощности ΔP .

Таким образом, на решение вопроса о выборе сечения не влияют уже произведенные ранее затраты $A_{\varphi 1}$, определившие тарифную стоимость электроэнергии, а влияют затраты на дополнительные, новые электростанции, которые необходимо построить в связи с ростом потребителей. Это многие упускают из виду, но из этого следует, что необходимо отказаться от учета фактической тарифной цены или себестоимости, что допустимо нормировать одинаковую экономическую плотность тока для разных энергосистем. Во всяком случае нельзя принимать в качестве расчетной стоимости электроэнергии величину, независимую от числа часов использования годового максимума мощности потерь. Не зависят от числа часов использования лишь затраты на топливо, они ложатся неизменной величиной на каждый выработанный киловаттчас. Годовые же расходы, связанные с ремонтом и амортизацией, ложатся на каждый киловаттчас тем меньшей величиной, чем больше число часов использования соответствующей нагрузки. Исходя из этих соображений, реальная оценка электроэнергии производится по двухставочному тарифу.

Если исключить все явные и скрытые постоянные, не зависящие от сечения затраты, то

$$\Sigma C = b's + B'p \frac{I^2}{s}. \quad (9)$$

При экономическом сечении s сумма затрат ΣC минимальна. При неэкономическом же сечении s_x , которое может быть принято за экономическое в результате применения ошибочных способов его определения, сумма затрат возрастет до величины ΣC_x . Из уравнений (8) и (9) найдем кратность перерасхода, связанного с такого рода ошибками,

$$\alpha = \frac{\Sigma C_x}{\Sigma C} = 0,5 \left(\frac{s_x}{s} + \frac{s}{s_x} \right). \quad (10)$$

Плотности тока для медных проводников, полученные из условия минимума стоимости «транспорта ампергода» и рекомендованные для широкого использования, доходят до 6, 10, 12 а/мм². Эти завышенные плотности вошли в «Правила» [Л. 2]. Но в «Правилах» рекомендуется и другая, не завышенная, экономическая плотность тока, равная 1,25 а/мм². Кратность перерасхода α , подсчитанная на основании этих данных по формуле (10), составит 4,9. В. М. Дмитриев рекомендует во много раз увеличить эти перерасходы за счет учета дополнительных постоянных слагающих затрат.

Чтобы более убедительно показать, какие перерасходы могут получаться в результате применения ошибочных методов определения экономической плотности тока, приведем конкретный пример. Возьмем провод с медными жилами марки ДПРГ-380, сечением 2×0,5 мм². Для этого провода «Правила» рекомендуют для широкого применения нагрузку 6 а. По экономической же плотности тока следует применять сечение 2×4 мм². Из таблицы, в которой дано сравнение затрат, следует, что перерасходы средств как по первоначальным затратам, так и по годовым расходам огромны. Если участок сети выполнить в соответствии с рекомендацией «Правил», то кратность перерасхода за 10 лет составит 5,2.

Наименование затрат	Сечение	
	2×0,5 мм ²	2×4 мм ²
Первоначальные затраты на провода, руб/км	320	940
Первоначальные затраты на станции, покрывающие мощность потерь (по 2,5 руб/квтч)	6 300	790
Затраты на ремонт и амортизацию (5%) за 10 лет, руб.	3 310	865
Затраты на топливо за 10 лет (по 7,5 коп/квтч при 5 000 час. в год), руб.	9 500	1 200
Суммарные затраты	19 430	3 795

Литература

1. Д. С. Лившиц. Об экономической плотности тока и потерях электроэнергии в сетях промышленных предприятий. Электричество, № 11, 1950.

2. Правила устройства электротехнических установок. Госэнергоиздат, 1950.

Кандидат техн. наук Л. А. ВААГ

Московский энергетический институт им. Молотова

В статье предлагается определять экономическую плотность тока, исходя из минимума затрат на передачу электрической энергии, при учете срока окупаемости дополнительных затрат. Однако, решая эту задачу применительно к заданным сечениям проводов, автор вместо определения экономической плотности тока и, следовательно, выбирая сечение кабеля для соответствующей нагрузки определяет возможный предел нагрузки кабеля определенного сечения, при котором затраты на передачу единицы энергии становятся минимальными.

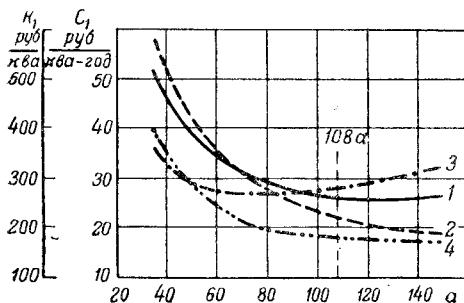
Если в кабеле определенного сечения повышать плотность тока против экономической, соответствующей выражению (7) рассматриваемой статьи, то затраты на передачу 1 кВт электроэнергии или 1 кВт передаваемой мощности будут уменьшаться до известного предела. Тем не менее, это еще не означает, что новая повышенная плотность тока, соответствующая такому минимуму затрат, будет, как это считает автор, наиболее оптимальной. Для данного тока кабеля экономически более целесообразно применить сечение, соответствующее выражению (7), так как это приведет к еще большему уменьшению затрат на передачу единицы энергии. Изложенное можно иллюстрировать примером, цифровые значения которого взяты из рассматриваемой статьи.

Необходимо передать на расстояние 2 км при напряжении 6,3 кВ мощность, равную 1180 кВт (ток 108 а); кабель прокладывается под усовершенствованными покровами мостовых.

Согласно формуле (12) и таблице указанной статьи выбирается кабель сечением $3 \times 25 \text{ мм}^2$, что соответствует и допустимой нагрузке по нагреву. Для этого сечения первоначальные затраты, подсчитанные по формуле (1), составят 314,5 тыс. руб., а затраты на 1 кВт передаваемой мощности — 266 руб. Годовые эксплуатационные расходы, подсчитанные по формуле (3), составят 33,3 тыс. руб., а расходы на 1 кВт передаваемой мощности — 28,2 руб.

Экономическая плотность тока, определенная по формуле (7), будет равна 1,37 а/мм², а экономическое сечение — 79 мм². Выберем кабель сечением $3 \times 70 \text{ мм}^2$. Первоначальные затраты для этого сечения составят 264,2 тыс. руб., а эксплуатационные расходы — 21,4 тыс. руб.; удельные показатели на 1 кВт передаваемой мощности по первоначальным затратам составят 224 руб. и по эксплуатационным расходам — 18,2 руб.

Сопоставление полученных результатов показывает, что выбор экономического сечения кабеля 70 мм², а не сечения 25 мм², полученного согласно рекомендуемому автором уравнению (12), дает существенное уменьшение как первоначальных затрат, так и эксплуатационных расходов. Как видно из графика, представленного на рисунке, кабель сечением 25 мм² имеет лучшие показатели по сравнению с кабелем сечением 70 мм² до тока нагрузки порядка 60 а, при токе же 108 а преимущество кабеля сечением 70 мм² становится очевидным.



Зависимость удельных первоначальных затрат и эксплуатационных расходов от тока нагрузки.

1—удельные первоначальные затраты K_1 при кабеле 25 мм²; 2—то же, при кабеле 70 мм²; 3—удельные эксплуатационные расходы C_1 при кабеле 25 мм²; 4—то же при кабеле 70 мм².

Несмотря на ошибочность рекомендуемой В. М. Дмитриевым формулы (12), предлагаемой для определения экономической плотности тока, в конце статьи, однако, делается совершенно правильное заключение о том, что экономические плотности тока, рекомендованные Министерством электростанций, не являются завышенными.

Максимальная плотность тока, экономически целесообразная только при учете одних первоначальных затрат, может быть определена по следующей формуле:

$$j_k = \sqrt{\frac{1000 b}{3 \rho \cdot K_a}},$$

где ρ — сопротивление 1 км кабеля при сечении 1 мм²; b — составляющая стоимость кабеля, зависящая от его сечения, отнесенная к длине 1 км и сечению 1 мм²;

K_a — стоимость 1 кВт установленной мощности на электростанциях, руб.

При $\rho = 18,8 \text{ ом/км}$, $b = 380 \text{ руб/км} \cdot \text{мм}^2$ и $K_a = 2500 \text{ руб/кВт}$, $j_k = 1,64 \text{ а/мм}^2$. На определение величины j_k не оказывает влияние срок окупаемости T_0 , величина которого всегда вызывает много споров (в данном случае $T_0 = 0$). Это позволяет считать j_k достаточно объективной величиной.

Однако плотность тока, установленная Министерством электростанций для кабелей 6 и 10 кВ, значительно выше. Как известно, она равна 2,25 а/мм². Если пользоваться приведенной выше формулой, такая плотность получится при $K_a = 1325 \text{ руб/кВт}$. Это означает, что установленная Министерством электростанций плотность тока дает экономию стоимости кабеля, равную 1325 руб., и увеличение потерь мощности в кабеле на 1 кВт. Для покрытия этих потерь на станциях необходимо иметь соответствующую мощность, стоимость установки 1 кВт которой равна примерно 2500 руб.

Следовательно, при существующей норме плотности тока имеются потери даже в первоначальных затратах, не говоря уже об эксплуатационных расходах, и повышать норму плотности тока никак не следует. Более экономичным будет дальнейшее ее снижение по мере развития производства цветных металлов.

Появление статьи В. М. Дмитриева свидетельствует о том, что в вопросе установления методики определения экономической плотности тока в проводах и кабелях имеется еще много путаницы и неясностей, требующих своего разрешения.

Доцент В. Т. РОЖДЕСТВЕНСКИЙ
Среднеазиатский политехнический институт

В рассматриваемой статье предлагается определять экономическую плотность тока для кабелей в отличие от существующих методов, исходя из минимальных удельных годовых расходов на единицу передаваемой мощности (1 кВт). При этом в расчет, помимо обычно принимаемых расходов, предлагается вводить еще расход на сооружение ячеек распределительного устройства на обоих концах рассчитываемой линии k_a . Однако этот расход прямо не связан с выбранным сечением кабеля и не должен оказывать влияния на расчет экономического сечения.

Не прибегая к вычислениям, можно также прийти к заключению, что расчет по удельному минимальному расходу на единицу передаваемой мощности не должен отличаться от расчета обычным способом, так как и в том, и в другом случае передаваемая мощность является величиной заданной, постоянной, а при проектировании сетей — исходной. Тем не менее у автора статьи выражение для экономической плотности получается иным, что свидетельствует лишь об ошибочности предлагаемого им способа.

Ошибка заключается в том, что в качестве заданной, постоянной величины берется не передаваемая мощность (или ток), а сечение кабеля s . Найденная таким образом экономическая плотность тока j'_c не соответствует минимуму удельного годового расхода, что нетрудно доказать путем несложных вычислений.

Приведем уравнение годовых расходов и расходов на передачу единицы тока к упрощенному виду:

$$C = A + \frac{B I^2}{s} + D s, \quad \left. \begin{array}{l} C_1 = \frac{C}{T} = \frac{A}{T} + B j + \frac{D}{j}. \end{array} \right\} \quad (4)$$

При обычном способе расчета, при котором величина I считается заданной, экономическая плотность тока j и соответствующие ей минимальные годовые расходы C выражаются следующим образом:

$$j_c = \sqrt{\frac{D}{B}}, \quad C_{1 \text{ мин}} = \frac{A}{I} + \sqrt{4BD}. \quad (5)$$

При расчете по способу В. М. Дмитриева уравнение расходов (4) может быть записано следующим образом:

$$C_1 = \frac{A}{js} + Bj + \frac{D}{j}. \quad (6)$$

Найденная из условия минимума расхода

$$\frac{dC_1}{dj} = -\frac{A}{j^2 s} + B - \frac{D}{j^2} = 0$$

экономическая плотность тока

$$j_c' = \sqrt{\frac{A + Ds}{Bs}}. \quad (7)$$

Подставляя в выражение (7) вместо сечения его выражение через ток и экономическую плотность и решая полученное уравнение относительно j_c' , получим:

$$j_c' = \frac{A}{2BI} + \sqrt{\frac{A^2}{4B^2 I^2} + \frac{D}{B}}, \quad (8)$$

Затем, подставляя выражение (8) в уравнение расходов (6), получим:

$$C_{1 \text{ мин}} = \frac{A}{I} + \sqrt{4BD + \frac{A^2}{I^2}}. \quad (9)$$

Таким образом, из выражения (9) следует, что минимальные годовые расходы, полученные в результате расчета по способу В. М. Дмитриева, больше минимальных годовых расходов, полученных обычным путем (5).

Сказанное можно иллюстрировать расчетом, исходные данные для которого взяты из рассматриваемой статьи, а именно:

$k_x = 20000$ руб., $a = 22000$ руб/км, $b = 350$ руб/км мм^2 , $\tau = 2700$ час, $\beta = 0,15$ руб/квтч, $\rho = 18,80$ ом \cdot мм 2 /км, $p = 8\%$, $I = 0,5$ км.

Определим постоянные A , B и D :

$$A = \frac{k_x p}{100} + \frac{a I p}{100} = 2480,$$

$$B = \frac{3\beta\tau l}{1000} = 11,5,$$

$$D = \frac{b I p}{100} = 14.$$

Удельные годовые расходы для упрощения определены на единицу тока. Результаты расчета приведены в табл. 1 и 2. В первой численные значения удельных годовых расходов C_1 найдены по методу В. М. Дмитриева, во второй — обычным способом.

ОТ РЕДАКЦИИ

Помещаемые в настоящем номере отклики на статью В. М. Дмитриева «Определение экономической плотности тока в кабельной сети» свидетельствуют о непригодности методики предложенной автором статьи.

Как видно из откликов, эта методика не пригодна и для оценки экономичности режима уже проложенного кабеля при росте его нагрузки. Не в интересах народного хозяйства ограничивать нагрузку потребителей той плотностью тока, которая может быть получена по приведенным в статье В. М. Дмитриева формулам (10) и (12), так как это привело бы к неполному использованию средств промышленных предприятий.

Таблица 1

$s = 25 \text{ мм}^2$		
$j, \text{ а/мм}^2$	$I, \text{ а}$	$C_1, \text{ руб/а}$
1,0	35	96,5
2,0	70	65,4
2,8	100	62
3,4	120	63,8

Таблица 2

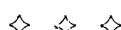
$I = 100 \text{ а}$		
$s, \text{ мм}^2$	$j, \text{ а/мм}^2$	$C_1, \text{ руб/а}$
35	2,8	62
70	1,43	51,1
95	1,05	50,2
120	0,83	51,2

Из табл. 1 следует, что для кабеля сечением 35 мм^2 минимальные годовые расходы, составляющие 62 руб/а, получаются при экономической плотности тока $2,8 \text{ а/мм}^2$. Передаваемый ток при этом составляет 100 а . Согласно же данным табл. 2 для передачи тока 100 а более выгодным по годовому расходу (без учета срока окупаемости) является сечение 95 мм^2 (экономическая плотность тока около 1 а/мм^2). Годовые расходы при этом сечении составляют $50,2$ руб/а.

Расхождение результатов расчета тем и другим методом тем больше, чем меньше расчетный ток, чем больше составляющая первоначальных затрат, не зависящая от сечения, и чем меньше расчетная длина кабеля. Поэтому приведенные на рис. 2 рассматриваемой статьи кривые соответствуют лишь частному случаю, когда длина кабеля равна 2 км . Делать на основании этого частного случая общие заключения нельзя.

Таким образом, предлагаемый В. М. Дмитриевым метод расчета не дает правильного решения задачи нахождения наивыгоднейшего сечения кабеля, исходя из минимальных годовых расходов.

Такие факторы, как стоимость присоединения кабеля к распределительному устройству k_x и длина кабеля l , которые В. М. Дмитриев ввел в расчет, несомненно, имеют существенное значение в экономике проектируемых сетей. Однако учитывать их следует не при определении наивыгоднейшего сечения, а при выборе схемы распределения энергии, что обычно и делается путем сравнения вариантов. Предлагаемая В. М. Дмитриевым формула (12) не избавляет от необходимости сравнения схем, при котором учитываются и длина кабелей, и стоимость их присоединения. Следовательно, дополнительный учет этих факторов оказывается излишним.



Заметки и письма

БОЛЬШЕ ОТВЕТСТВЕННОСТИ В РАБОТЕ АВТОРА

Рекомендация Управлением учебных заведений Министерства сельского хозяйства СССР книги П. Н. Листова «Применение электрической энергии в сельском хозяйстве» не должна была бы оставлять сомнений о качестве книги. Однако, к сожалению, приходится отметить в ней весьма многие и существенные недостатки, что заставляет сделать вывод о том, что управление учебными заведениями МСХ явно поторопилось, рекомендовав данную книгу как массовое учебное пособие.

Сентябрьский пленум ЦК КПСС поставил в качестве одной из задач по дальнейшему развитию сельского хозяйства СССР улучшение издания массовой литературы по различным вопросам сельскохозяйственной науки и передовой практики, а также учебников и наглядных пособий для сельскохозяйственных учебных заведений.

Выпущенная же Сельхозгизом книга П. Н. Листова содержит большое количество ошибок, страдает некритическим подбором материала и методическими погрешностями, что вместе с дефектами изложения крайне снижает возможность использования этой книги по назначению.

Детальный разбор всей книги привел бы к составлению рецензии, мы же имеем в виду ограничиться лишь некоторыми замечаниями.

На стр. 39 автор утверждает, что заполнение колбы лампы накаливания инертным газом уменьшает теплоотдачу нити лампы. Это неверно, присутствие в колбе инертного газа, целесообразное по многим причинам, обладает как раз тем дефектом, что увеличивает тепловые потери. Впрочем, сам автор в табл. 16 на стр. 40 приводит, противореча себе, данные об этих потерях.

В табл. 17 на стр. 41 «Нормальные лампы накаливания» имеется 7 ошибок в данных световой отдачи ламп и много неточностей, вызванных устарелостью содержащихся в таблице сведений.

Почти всю стр. 42 занимает табл. 19 «Лампы накаливания безопасного напряжения и светомаскировочные». В этой таблице свыше десятка ошибок и отклонений от действующего ОСТ.

Стр. 45 целиком посвящена ртутным лампам типа «ИГАР», которые не применяются для осветительных целей. Сведения об этих лампах содержат грубые ошибки. Кроме того, лампы ИГАР-3 и 4 давно сняты с производства.

Имеющим применение в сельском хозяйстве ртутно-кварцевым лампам ПРК, кроме краткой маловразумительной таблицы, места не удалено.

Последние две с половиной страницы раздела отведены получающим все более широкое применение люминесцентным лампам. Не довольствуясь общепринятым их наименованием, автор называет их еще люминофорными, что не мешает ему, однако, назвать их на стр. 117 флуоресцентными без указания, что это одно и то же. Объяснение работы ламп выполнено в стилистическом отношении крайне неряшливо. Назначение дросселя не пояснено, вольтамперные характеристики дросселей, рабочие и пусковые токи ламп не приведены. Две таблицы по люминесцентным лампам (24 и 25) содержат ошибки: неверно указана величина световых потоков и др.; к. п. д. ламп преувеличен. Вместе с тем необходимых для эксплуатации сведений об этих лампах из их описания в книге получить нельзя.

Многочисленные дефекты и небрежность, проявленная автором и редактором, обнаруживаются даже при беглом просмотре книги.

На рис. 41 «Электросветоловушка с вентилятором» изображено всё, кроме основного — самого вентилятора. Рис. 45 «Машина для облучения дрожжей» представляет собой бесполезную для читателя загадочную картинку с рядом необъясняемых и непонятных по назначению деталей. Не менее загадочной является насчитывающая десяток графических и смысловых ошибок схема электроосвещения комбайна (рис. 55).

На рис. 48 аккумулятор показан составленным из семи банок, т. е. 14-вольтовым; такие аккумуляторы применение на автомашине и тракторах не имеют. Приведенные примеры, количество которых можно во много раз умножить, относятся только к первым 126 страницам, а всего их в книге 560.

Наглядным примером некритичности подбора материала служит раздел «Электромеханическая дойка». На 18 страницах (432—450) необычайно подробно рассказано об истории вопроса, принципе действия и общем устройстве доильных аппаратов. Приведены детальные инструкции по доению и даже теоретические рассуждения о процессе сосания теленком. Возможно, конечно, что все это будущий электрификатор прочтет с интересом, но он с нетерпением ждет, когда же начнется описание электрической части устройства. Вот оно (стр. 435): «В качестве двигателя, вращающего насос, удобнее всего применять электродвигатель мощностью 2,6—3,0 квт, но может быть использован и любой другой двигатель указанной мощности». Это все! Три строчки из 18 страниц. И это в курсе «Применение электрической энергии». В довершение рис. 256 (стр. 445) воспроизводит конструкцию доильной установки с ... бензиновым двигателем. От электротехники в этом устройстве только магнето двигателя!

Бесчисленны стилистические погрешности книги, подчас искажающие смысловое значение сказанного: «... осуществил электрическое освещение от угольных ламп накаливания на паровом судне» (стр. 31); «Светотехника как наука занимается вопросами производства и использования лучистой энергии оптической области спектра» (стр. 33); «...для облучения птиц (пыгия, кур и т. д.)» (стр. 46); «... Нагреваемыми до 700° электрическим током никромовыми проволоками ...» (стр. 124) и пр.

Автор книги вместе с редактором А. М. Шидаревым, техническими редакторами Н. Н. Соколовым и А. И. Баллодом и учеными помощниками Л. Г. Прищеп и Т. П. Саймиловой, которым автор выражает благодарность за подготовку рукописи, не только включили ряд материалов в книгу без элементарной проверки, но даже не дали себе труда унифицировать и проверить в них термины, буквенные и условные обозначения. Примером неряшливиности служит, например, стр. 239: «Буквенные обозначения аппаратов следующие: первая буква — наименование аппарата, вторая его назначение. Например, ... РУ — реле ускорения, РТ — реле торможения, 1РТ — первое реле ускорения, 2РТ — второе реле ускорения и т. д.» К слову говоря, после этой путаницы, шестью строками ниже буквами РТ обозначено реле тепловое!

Существенны также методические погрешности книги как учебного пособия. Крайне, например, интересный для техника-электрификатора материал об установке электродвигателей, о расчете шкивов, о ременной передаче и т. п. излишне сжат и помещен не в соответствующий раздел по электроприводу, а гораздо ниже, в «Сведения по кормоприготовительным машинам и их характеристики», где отыскать его можно только случайно.

Встречаются, например, такие описания: «5. Гидравлические тараны. Эти водоподъемники применяют в тех хозяйствах, где имеется источник проточной воды с перепадом не менее одного метра. Особенностью таранов является то, что они работают без всякого двигателя — автоматически, чрезвычайно просты по устройству и долговечны в эксплуатации» (стр. 252). Не говоря уже о том, что гидравлический таран имеет весьма отдаленное отношение к применению электрической энергии, что может почерпнуть из вышеприведенного не только учащийся, но технически и более грамотный человек, если он не знаком с этим устройством из других источников?! Описание недополнено ни рисунком, ни каким-либо разъяснением.

В книге не нашлось места для описания способов канализации электрической энергии, методов расчета и устройства внутриколхозных линий электропередачи, элек-

триоизмерительных приборов и измерений и многое другого, необходимого для техника сельской электрификации.

В книге находит применение технические термины, устаревшие и имеющие характер технического жаргона.

В заключение напрашивается вывод о недостаточной требовательности со стороны издательства и управления учебных заведений МСХ к автору и редактору книги, не

обеспечивших ответственного отношения к важному делу создания высококачественного учебного пособия по сельской электрификации.

Инж. В. Г. ЛУКАЧЕР

Московский станко-инструментальный институт имени Сталина

ОТ РЕДАКЦИИ

Управление учебных заведений Министерства сельского хозяйства в связи с запросом редакции журнала «Электричество» признало, что при издании книги П. Н. Листова автор и Сельхозгиз допустили ряд недочетов. УУЗ МСХ на основе обсуждения рукописи проф. П. Н. Листова предложило автору и Сельхозгизу дополнить и отредактировать ряд глав с целью устранения содержащихся в рукописи недостатков, однако эта доработка была выполнена автором и Сельхозгизом неудовлетворительно. В заключение УУЗ МСХ сообщает, что Сельхозгизу предложено принять меры к более тщательной подготовке рукописей учебной литературы к изданию.



По страницам технических журналов

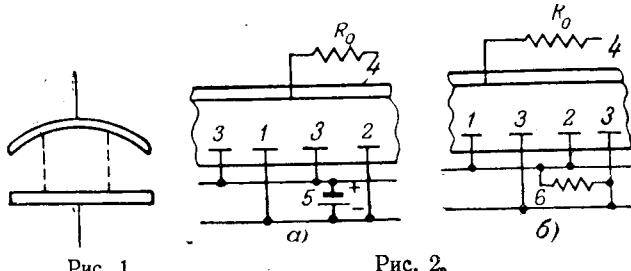
МНОГОПОЗИЦИОННЫЕ ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ

(Обзор)

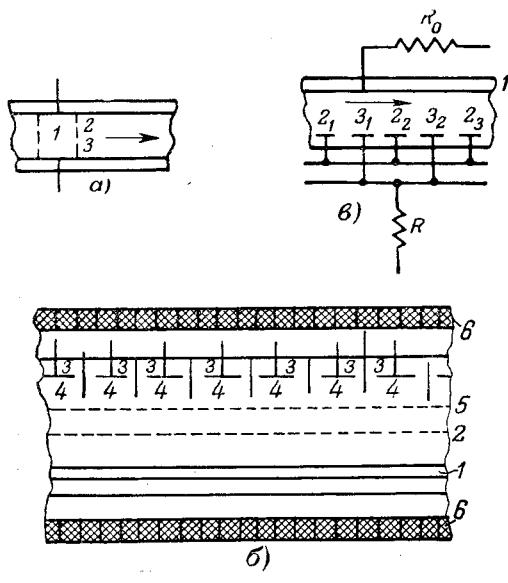
До последнего времени быстродействующие многопозиционные переключатели, применяемые в электроизмерительной, исполнительной и автоматической аппаратуре, строились на основе использования вакуумных и газоразрядных двухпозиционных выключателей. Из последних обычно составляются кольцевые схемы, выполняющие функции многопозиционных распределителей. Стремление к повышению надежности аппаратуры с распределителями способствовало разработке многопозиционных газоразрядных переключателей, характерной особенностью которых является использование локализованного газового разряда, легко перемещающегося по прибору под действием поступающих на него электрических сигналов.

Самопроизвольная концентрация газового разряда в определенной зоне прибора и, в частности, на фиксированном электроде имеет место при минимальной работе тока разряда в этом участке. Так, например, при затрудненном разряде, происходящем под грибком (рис. 1), разряд концентрируется в центральной части межэлектродного пространства, где работа тока разряда минимальная.

Для другого способа концентрации [Л. 1...3] газового разряда используются вспомогательные электроды, окружающие область разряда и мешающие его распространению. Вспомогательные электроды 1 и 2 включаются через батарею 5 (рис. 2, а) или сопротивление 6 (рис. 2, б), а между катодом 3 и анодом 4 происходит тлеющий разряд. В многопозиционных переключателях зоны пониженной работы тока разряда чередуются с зонами его повышенной работы. Для предотвращения одновременного разряда в двух зонах повышенной работы последовательно с переключателем включается сопротивление R_0 , ограничивающее ток разряда так, что он вынужден сосредоточиться в одной из зон [Л. 1...3]. Перемещение газового



разряда внутри многопозиционного переключателя осуществляется магнитным или электрическим полем [Л. 1, 3], а также самопроизвольным смещением его по электроду из областей затрудненного разряда [Л. 2]. На рис. 3, а газовый разряд в области 1, происходящий между электродами 2 и 3, смещается магнитным полем, перпендикулярным плоскости рисунка в направлении, показанном стрелкой. Магнитное поле, смещающее разряд, может быть бегущим и постоянным. На рис. 3, б показана принципиальная схема многопозиционного переключателя с бегущим магнитным полем. Внутри полости прибора, наполненной разреженным газом, находятся: катод 1 и вспомогательный сетчатый анод 2, за которым в ячейках 3 расположены ламели 4, закрытые сетками 5. Около коммутатора размещены катушки 6, создающие бегущее магнитное поле, перпендикулярное плоскости схемы. Катушки, разбитые на группы, питаемые переменными токами, сдвинуты по фазе, расположены так, чтобы получалось бегущее магнитное поле, увлекающее за собой газовый разряд между катодом 1 и вспомогательным анодом 2. Сетка 5 имеет отрицательный потенциал, предотвращающий проникновение разряда на ламели 4. При подаче на сетку импульса положительного напряжения разряд замыкается на ту ламель, против которой в момент импульса оказывается



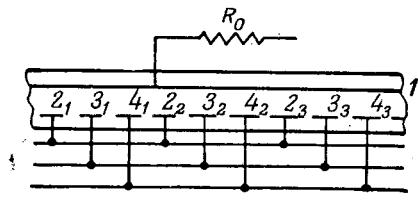


Рис. 4.

бегущий разряд. На рис. 3,в показана принципиальная схема многопозиционного переключателя с постоянным магнитным полем. В приборе находятся катод 1 и расположенные параллельно ему анод 2 и управляющий электрод 3, на который подаются импульсы тока, снимаемые с сопротивления R . Электроды 2 и 3 имеют чередующиеся выступы $2_1, 3_1, 2_2, 3_2, \dots$, обращенные в сторону катода. Прибор помещается в однородное магнитное поле, направленное перпендикулярно плоскости чертежа, и получающийся внутри прибора тлеющий разряд сдувается в направлении стрелки.

На управляющий электрод 3 подается потенциал, значительно более низкий, чем на анод. Поэтому тлеющий разряд, возникший на первом левом выступе анода, сдувается магнитным полем на его правый край, где задерж-

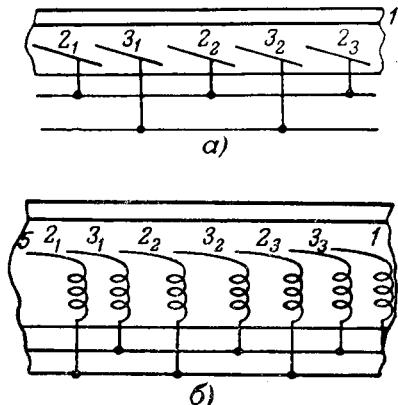


Рис. 5.

живается до подачи на управляющий электрод импульса напряжения, в результате чего потенциал электрода становится выше потенциала анода, а разряд переходит с выступа анода 2_1 на выступ 3_1 управляющего электрода. По прекращении импульса разряд переходит на следующий выступ 2_2 анода, где вновь задерживается до следующего положительного импульса напряжения, поступающего на управляющий электрод и позволяющего разряду сместиться на шаг дальше.

Самопроизвольное смещение разряда наблюдается в системе из нескольких электродов, по которым пробегает волна напряжения, уводящая разряд в заданном направлении. На рис. 4 показана принципиальная схема такого многопозиционного переключателя, состоящего из длинного анода 1, разделенного на части катода 2, и вспомогательных электродов 3 и 4, соединенных в две группы. Предположим, что в начальный момент времени разряд находился на электроде 2_1 . При подаче на третью группу импульса отрицательного напряжения потенциал ее окажется ниже потенциала второй группы, и разряд, ограничиваемый сопротивлением R_0 , немедленно перейдет на электрод 3_1 . Подача вслед за этим на четвертую группу еще большего отрицательного импульса заставляет разряд перейти на электрод 4_1 . При снятии обоих отрицательных импульсов разряд перебрасывается на электрод 2_2 и т. д.

Возможно осуществление самопроизвольного смещения разряда при изготовлении плоских электродов из материала с высоким удельным сопротивлением, по которым разряд может легко смещаться в сторону выводов. Однако проще и удобнее получать самопроизвольное смещение разряда за счет геометрии разрядных промежутков между электродами. Принцип действия такой системы поясняется

схемой рис. 5,а, на которой изображен отрезок трубки, в которой находятся длинный анод 1 и расчлененные холодный катод 2 и вспомогательный электрод 3. В нормальных условиях потенциал электрода 3 значительно выше потенциала холодного катода. Давление газа внутри прибора подбирается таким, чтобы разряд между анодом и катодом был затрудненным. Разряд, начавшийся в узкой части зазора между анодом 1 и электродом 2_1 , самопроизвольно смещается в самую широкую часть зазора между этими электродами. При поступлении на вспомогательный электрод 3 импульса отрицательного напряжения, делающего его потенциал меньшим потенциала катода, газовый разряд переходит в зазор между электродами 1 и 3_1 , внутри которого самопроизвольно смещается в самую широкую часть, и задерживается здесь до прекращения отрицательного импульса. По окончании импульса разряд переходит в зазор между электродами 1 и 2_2 и т. д.

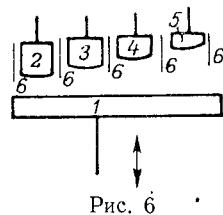


Рис. 6.

Работа промышленных образцов таких переключателей основана на том, что при соответствующем давлении газа внутри прибора условия для разряда на спиральный катод 4 и на имеющийся на его конце вытянутый усик 5 (рис. 5,б) существенно различны. Разряд на усик более затруднен, чем разряд на спираль того же электрода, поэтому разряд, попавший на усик электрода, самопроизвольно смещается на его спираль. Принципиальная схема подобного устройства изображена на рис. 5,б. Против анода 1 находятся спиральные катоды $2_1, 2_2 \dots$ и спиральные вспомогательные электроды $3_1, 3_2 \dots$, расположенные так, что усик последующего электрода подходит к спирали предыдущего. Электроды 2 и 3 соединены в отдельные группы. Положим, что в начальный момент времени разряд происходит между анодом и электродом 2_1 . При подаче отрицательного импульса напряжения на третью группу разряд переходит с электрода 2_1 на усик электрода 3_1 , а затем самопроизвольно смещается на его спираль. По окончании импульса разряд переместится на усик электрода 2_2 и соскочит на его спираль, где задержится до поступления следующего импульса, перемещающего его на шаг дальше.

На рис. 6 приведена схема еще одного типа многопозиционного переключателя импульсного разряда, управляемого перемещением подвижного электрода. Катод 1 перемещается в направлении, показанном стрелкой, относительно анодов 2, 3, 4, 5, разделенных изоляционными перегородками 6. При подаче на катод импульса отрицательного напряжения происходит разряд на тот анод, расстояние между которым и катодом соответствует в этот момент минимальному разрядному напряжению.

Литература

1. G. H. Hough. The Inst. of Electrical Eng., т. 99, III, стр. 166, № 59, 1952.
2. D. S. Peck. Electrical Eng., т. 71, стр. 1136, № 12, 1952.
3. D. C. Barnes, E. H. Cooke-Jarbourg, M. A. Thomas. Electronic Eng., т. 23, стр. 341, № 283, 1951.
4. Л. А. Гончарский. Журнал технич. физики, т. 12, стр. 478, № 8, 1942.
5. G. Hough, Rider. Electronic Eng., т. 24, стр. 242, июнь 1952.
6. H. Fühauf. Nachrichtentechnik, т. 2, стр. 16, № 1, 1952.

Кандидат техн. наук Л. А. ГОНЧАРСКИЙ

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА САМОЛЕТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Увеличение генерируемых мощностей и усложнение самолетных электрических систем постоянного тока вызвали необходимость надежной защиты их отдельных элементов, в том числе генераторов и фидеров.

В силу большой вероятности коротких замыканий на корпус при использовании его в качестве обратного провода и значениях токов короткого замыкания, достигающих 10 000 а, быстрое и селективное отключение поврежденного элемента системы наиболее надежно обеспечивается дифференциальной защитой генераторов. Ниже приводятся некоторые схемы защиты генераторов.

На рис. 1 защита осуществляется поляризованным реле, имеющим последовательную и параллельную обмотки. Недостатком схемы является зависимость падения напряжения на параллельной обмотке от температуры генератора.

Для устранения этого недостатка можно предусмотреть температурную компенсацию или использовать схему рис. 2, в которой шунты и последовательная обмотка возбуждения генератора 3 имеют одинаковые температурные коэффициенты.

Однако при этом появляется опасность ложных срабатываний защиты, поскольку обмотка 2 вследствие индуктивного влияния реагирует на переходные процессы, происходящие в обмотке 3 при изменениях нагрузки, тогда как обмотка 1 к этим процессам нечувствительна.

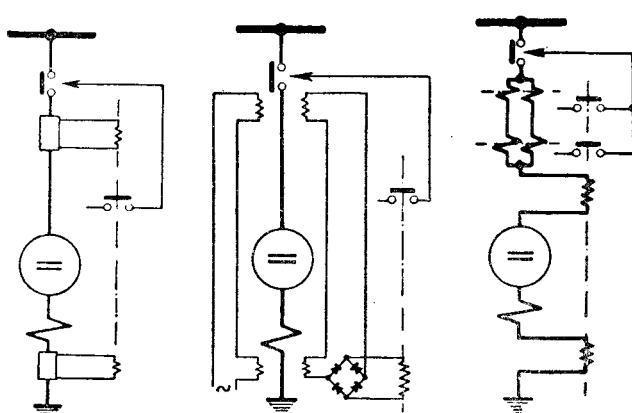


Рис. 4

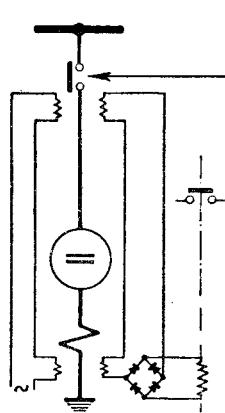


Рис. 5

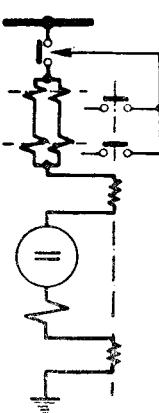


Рис. 6

схеме, не действует. При коротком замыкании в зоне защиты потоки обмоток складываются и реле срабатывает. Недостатком схемы является наличие дополнительной цепи переменного тока 400 гц, потребляющей при нормальном режиме 5 вт.

В отличие от приведенных схем, в которых генератор защищается вместе с фидером, могут быть применены схемы раздельной защиты типа изображенной на рис. 6. Фидер может быть защищен поперечной (в случае применения расщепленных проводов) или продольной дифференциальной защитой.

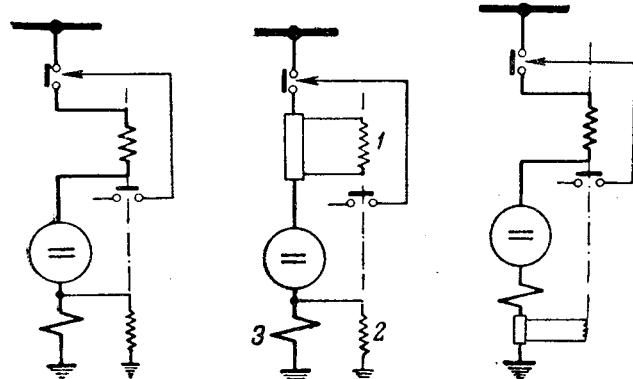


Рис. 1

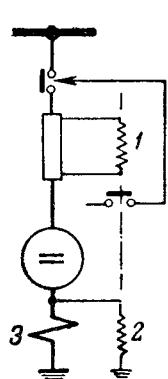


Рис. 2

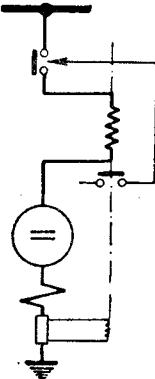


Рис. 3

На рис. 3 представлена схема, аналогичная рис. 2, где использование шунта со стороны отрицательного зажима генератора исключает влияние колебаний температуры его обмотки возбуждения.

Более громоздкая двухшунтовая схема рис. 4 устраняет температурные и переходные небалансы.

Основным недостатком схем с шунтами является необходимость отвода тепла от шунтов, их значительный вес и габариты.

Схема рис. 5, использующая дроссели с подмагничиванием, исключает указанные недостатки и отличается высокой чувствительностью.

Первичные обмотки дросселей соединены последовательно и питаются от источника переменного тока 400 гц. Благодаря встречному включению вторичных обмоток при нормальном режиме и сквозных коротких замыканиях магнитный поток отсутствует, и реле, питаемое по мостовой

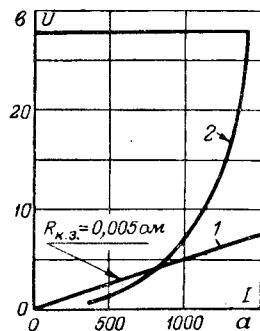


Рис. 7

Во всех схемах для срабатывания реле и контакторов требуется определенное напряжение, которое не всегда может быть обеспечено при авариях, что иллюстрируется рис. 7, на котором приведены вольтамперная характеристика генератора 28 в, 400 а при наличии регулятора напряжения 2 и его характеристика короткого замыкания 1.

Схемы рис. 5 и 6 являются наиболее надежными, хотя и нуждаются в доработке в части упрощения и использования мощности короткого замыкания для отключения последнего.

Литература

1. Transactions AIEE, ч. 2, 1952.
2. Westinghouse Engineer, № 9, 1950.
3. General Electric Review, № 6, 1946.

Кандидат техн. наук В. Н. ИСТРАТОВ
Инж. А. В. КАМЕНСКИЙ



Хроника

Пленум правления ВНИТОЭ

XVII пленум Правления ВНИТОЭ в апреле с. г. обсудил итоги деятельности Общества за 1953 г. и задачи текущего года.

В настоящее время ВНИТОЭ объединяет более 20 000 ученых, инженеров и техников, работающих в электротехнической промышленности и энергохозяйстве. В истекшем году Общество провело конкурс имени академика Б. Е. Веденеева и конкурс имени академика Г. О. Графтио; темами конкурсов были работы в области гидроэнергетики и по экономии электрической и тепловой энергии. Для обеспечения широкой информации о лучших предложениях по экономии электроэнергии Общество издало сборники, содержащие описание одобренных методов и рекомендаций.

В 1953 г. Обществом было проведено 469 научно-технических совещаний и конференций. Наиболее значительными из них в смысле разработки актуальных вопросов были совещания и конференции: по проектированию и строительству гидроэлектростанций, по проектированию и строительству тепловых сетей, по электроснабжению крупных строек, по электрическим сельскохозяйственным машинам, по электрооборудованию и автоматизации сельских энергоустановок, по тяговому электрооборудованию, по электрической изоляции и др.

Активизируя развертывание критики и самокритики в науке и технике организации ВНИТОЭ провели 86 дискуссий, в которых приняли участие 2 637 чел. Темой дискуссий были правила и нормы, проекты стандартов, методика проектных расчетов, новые типы и конструкции соружений и оборудования и др.

Для повышения деловой квалификации членов Общества были проведены семинары и курсы с охватом свыше 11 тыс. членов ВНИТОЭ.

Общество уделяло в 1953 г. большое внимание истории отечественной энергетической техники: были проведены собрания и научные сессии, посвященные ряду событий. Были отмечены памятные даты о Г. В. Рихмане, В. Н. Чиколеве и А. Н. Лошагине. В отделениях Общества

отмечался пуск местных электростанций. В первичных организациях ВНИТОЭ проводились читательские конференции по книгам и журналам. Особо полезным оказалось предварительное обсуждение авторских рукописей до передачи их в издательства.

Общество уделяло в 1953 г. большое внимание вопросам повышения качества энергетической периодики. В Ростове-на-Дону, в Харькове, в Горьком, в Ленинграде были проведены читательские конференции по журналам: «Электрические станции», «Гидротехническое строительство», «Промышленная энергетика», «Известия ВНИИГ» и «Торфяная промышленность». Читательская конференция по журналу «Гидротехническое строительство» состоялась на стройплощадке Горьковской гэс. Было отмечено, что не все дискуссии доводятся в журнале до конца. Участники пленума указывали на целесообразность подведения итогов дискуссий на специальных совещаниях ВНИТОЭ с тем, чтобы их решения публиковались журналами. На читательских конференциях указывалось также на то, что в электротехнических журналах почти не освещается опыт эксплуатации гэс, не уделяется внимания вопросам экономики, мало рецензируется энергетическая литература и др.

В истекшем году усилилась издательская деятельность ВНИТОЭ.

Для оказания помощи энергетическим стройкам страны организации ВНИТОЭ проводили общественные смотры проектов энергоустановок, шефствовали над строительством электрических станций.

Пленум признал необходимым усилить роль всесоюзных научно-технических секций как объединений энергетиков одной специальности. Президиуму Правления было предложено увеличить количество выездов членов Правления и работников аппарата ВНИТОЭ в отделения. Пленум одобрил предоставление большей самостоятельности правлениям отделений.

Инж. Г. О. ЛЕВИТ

В Московском электромеханическом институте инженеров железнодорожного транспорта им. Дзержинского

С 22 по 26 апреля 1954 г. в МЭМИИТ была проведена 17-я научно-техническая конференция кафедр института. Вопросам электротехники на транспорте была посвящена работа секций «Электрические железные дороги и электроподвижной состав» и «Электротехнической».

На первой из названных секций сначала были заслушаны три доклада по вопросам выбора наивыгоднейших характеристик тяговых двигателей и средств их обеспечения. Эти вопросы подвергались уже обсуждению (Электричество, № 2 и 9, 1952). В докладе доц. Г. Г. Марквардта «О наивыгоднейших характеристиках тяговых двигателей» была изложена позиция МЭМИИТ в этом вопросе (см. статью Г. Г. Марквардта и П. Н. Шляхто, Электричество, № 2, 1952). На ряде примеров докладчик показал преимущества, получаемые при характеристиках тяговых двигателей, приближающихся к характеристикам постоянства мощности как с точки зрения устройства тягового энергоснабжения, так и с точки зрения работы электроподвижного состава. Одновременно в докладе подчеркивалось, что характеристика не является единственным мерилом, определяющим выбор конструктивных параметров двигателей.

Доклад доц. П. Н. Шляхто «Пути модернизации тяговых двигателей постоянного тока» был посвящен выявлению конструктивно-расчетных путей получения тяговых двигателей с более высокими технико-экономическими показателями и более высокой эксплуатационной надежностью. Предлагаемые конструктивные принципы дают возможность приблизить характеристики тяговых двигателей к характеристикам постоянства мощности путем снижения насыщения магнитной системы и расширения пределов регулирования возбуждения.

В докладе доц. Д. Д. Захарченко «Модернизация системы управления электроподвижным составом» рассматривался вопрос о возможностях повышения тяговых и регулировочных свойств электровозов, которые представляются при внедрении тяговых двигателей с характеристиками, приближающимися к характеристикам постоянства мощности. Особенно важным является наибольшее полное использование мощностей главным образом при высоких скоростях за счет повышения регулировочных способностей локомотивов. Отмечено, что электровозы ВЛ-22 и ВЛ-19, тяговые характеристики которых удовлетворительны для горного профиля, весьма мало отвечают этим

условиям, что является следствием высокого насыщения магнитной системы двигателей. Более благоприятные результаты дает тяговый двигатель НБ-406А нового восьмиосного электровоза. Путем дальнейшего снижения насыщения магнитной системы тяговых машин при тех же удельных мощностях возможно довести предельную скорость реализации номинальной мощности двигателя до скоростей, превышающих 80% от V_{\max} .

Возможности экономического регулирования режимов работы подвижного состава оценены коэффициентом регулируемости

$$\kappa_{reg} = \frac{\Sigma (V_{on\ max} V_{nn})}{V_{\max}}.$$

Коэффициент κ_{reg} зависит как от схемы электроподвижного состава, так особенно от пределов регулирования возбуждения и насыщения магнитных систем тяговых машин. В докладе приводились диаграммы зависимости κ_{reg} от силы тяги электровозов. В практических выводах рекомендовалось наряду с дальнейшей работой по улучшению характеристик тяговых двигателей проведение ряда мероприятий по модернизации систем управления электровозами.

В результате обсуждения этих трех докладов секция пришла к выводу, что при конструировании тяговых двигателей следует использовать все возможности для приближения к характеристике $FV = const$ при одновременном учете всех остальных требований, предъявляемых к тяговому двигателю. В связи с невозможностью полного достижения характеристик постоянства мощности наиболее целесообразными являются характеристики двигателей с оптимальным насыщением магнитной системы при широком регулировании возбуждения двигателей, так как эти характеристики более других приближаются к характеристикам постоянства мощности. В зоне высоких тяговых усилий приближение к гиперболической характеристике имеет меньшие преимущества и связано с большими конструктивными затруднениями. Секция одобрила направления, принятые МЭМИИТ в вопросе улучшения качества характеристик тяговых двигателей и электровозов. При особом мнении остался доктор техн. наук А. С. Димитрадзе; он указал, что характеристика, приближающаяся к кривой постоянства мощности, не является наивыгоднейшей и что таковой следует считать характеристику постоянства скорости.

Доктор техн. наук, проф. К. Г. Маркварт в докладе «О понятии предела устойчивости пропускной способности электрических железных дорог» показал, что существующее в литературе утверждение о том, что пропускная способность имеет предел устойчивости, является неправильным, совершенно иска-

жающим представление о работе электрической дороги. В действительности, при рассматривавшихся двигателях с серийными характеристиками эта величина является устойчивой и может определяться как и при различных видах автономной тяги по времени занятия ограничивающего перегона.

Доклад доц. И. П. Исаева «Исследование допусков на характеристики электровозов» содержал математически обоснованный метод установления функциональных зависимостей частных и полных допусков от режима работы тягового двигателя. Предложенный метод подтвержден результатами статистической обработки материалов заводских испытаний тяговых двигателей ДПЭ-400 и паспортных испытаний электровозов ВЛ-22м. На основании анализа существующих нормативов допусков даны практические рекомендации, направленные на повышение использования мощности электровоза.

Инж. В. М. Лисицын в докладе «Новый принцип тягового двигателя однофазного тока» сообщил результаты проведенной в МЭМИИТ разработки нового принципа устройства тягового двигателя однофазного тока нормальной частоты.

На электротехнической секции доц. М. Д. Находкин сделал доклад по вопросу классификации характеристик тяговых двигателей постоянного тока. Используя уравнение кривой намагничивания, автор математически обосновал возможность получения в долевых единицах семейства скоростных и тяговых характеристик, причем каждая из них определяется одной величиной γ , названной «коэффициентом характеристики». Особенностью предлагаемого метода описания типа характеристики этим коэффициентом является то, что он органически связан с тяговыми расчетами, которые неизбежно приходится производить при установлении желаемых рациональных параметров тягового двигателя, с одной стороны, и расчетом двигателя, как некоторого электромагнитного механизма, — с другой.

Инж. В. М. Агапов сообщил о результатах испытания схем самосинхронизации турбогенераторов малой мощности, проведенных на железнодорожных электростанциях, позволяющих распространить их на электростанции с двигателями высокой степени неравномерности.

Доц. М. В. Рогали-Левицкий сообщил о технико-экономической целесообразности применения телеуправления в энергосистемах железнодорожного транспорта.

В заключение на этой секции выступил доц. В. Н. Богоявленский с докладом «Асинхронные преобразователи частоты в применении к частотному регулированию асинхронных двигателей».

Все доклады были активно обсуждены.

Инж. М. В. КУДРЯВЦЕВ
МЭМИИТ

Научно-техническая конференция ВЗЭИ

В апреле с. г. состоялась пятая научно-техническая конференция Всесоюзного заочного энергетического института, в которой, кроме профессорско-преподавательского состава института, аспирантов и слушателей факультета усовершенствования инженеров, приняли участие также представители проектных организаций, энергосистем, заводов и др.

На конференции были заслушаны доклады о работах, выполненных профессорско-преподавательским составом по планам кафедр и в содружестве с промышленностью, доклады представителей промышленности, аспирантов и слушателей факультета усовершенствования инженеров ВЗЭИ.

В числе докладов были обсуждены следующие: доктора техн. наук, проф. Н. А. Сазонова «Электрификация сельского хозяйства», доктора техн. наук, проф. И. А. Сыромятникова «Повышение надежности работы энергосистем», кандидата техн. наук, доц. Р. Г. Извекова «Новые методы анализа и измерений в схемах с нелинейными характеристиками», кандидата техн. наук Н. Н. Линниченко «Единая

теория установившихся и переходных процессов в линейных системах», кандидата техн. наук, доц. Н. А. Мельникова «Питание силовых нагрузок от установок емкостного отбора мощности», кандидата техн. наук, доц. А. А. Степанкова «Теоретические основы технико-экономических расчетов в энергетике», кандидата техн. наук П. С. Арзамасцева «Применение систем следящего привода для автоматизации копировальных станков», инж. А. С. Иляхинского «Телемеханическое устройство для централизованного диспетчерского управления объектами энергохозяйств крупных промышленных комбинатов», инж. К. И. Кожевникова «Автоматическое регулирование возбуждения синхронных двигателей», инж. А. Г. Ермака «Усовершенствование технологии производства проводов и кабелей с полихлорвиниловой изоляцией на шприцпрессах».

Выступавшие обращали особое внимание на вопросы дальнейшего развития содружества научно-исследовательских работ Института с промышленностью.

А. К.

В Доме инженера и техника им. Дзержинского

Секцией электротермии Дома инженера и техника им. Дзержинского в Москве в мае с. г. была проведена научно-техническая сессия по обмену опытом в области эксплуатации электрических печей сопротивления. В сессии участвовало свыше 130 инженерно-технических работников заводов, проектных и научных организаций.

Вопросы улучшения производственной работы электрических печей, усовершенствования их в техническом и конструктивном отношениях, рациональной эксплуатации имеют большое народнохозяйственное значение. Электрические печи сопротивления и нагревательные приборы получили широкое распространение во всех областях народного хозяйства; в металлургии, машиностроении, на транспорте в легкой и пищевой промышленности и, наконец, в быту. Нагрев многих ответственных деталей и материалов, термическая обработка которых требует, чтобы заданный температурный режим был выдержан с большой степенью точности, производится в электрических печах сопротивления. Электрические печи широко применяются, когда необходим нагрев в атмосфере, защищающей изделий от окисления или обезуглероживания, или в цементирующем атмосфере, или в вакууме. Электрические печи сопротивления благодаря своей компактности и высокой степени автоматизации легко встраиваются в поточные и в автоматические линии. Между тем, обмен опытом в области электрочесторения организован неудовлетворительно, накопленный отдельными предприятиями опыт не известен другим предприятиям.

В докладах М. А. Шевцова, М. Я. Смелянского,

Г. С. Вайнберга и В. В. Гусарова были освещены основные тенденции в развитии современных электрических печей сопротивления, вопросы распространения высокопроизводительных, специализированных (в отношении проведения определенных термических процессов) и механизированных агрегатов непрерывного действия, применение защитных и специальных атмосфер и вакуума, расширения диапазона применения принудительной циркуляции атмосферы.

В выступлениях были вскрыты отдельные недостатки и недоработки в выпущенных конструкциях печей и еще не устраненные трудности, возникающие в эксплуатации электрических печей (неудовлетворительное качество огнеупоров и теплоизоляционных материалов, используемых в электрических печах, и др.). Опыт работы автозаводов Московского им. Сталина и Горьковского им. Молотова в области рациональной эксплуатации электрических печей был освещен в докладах М. И. Трехова и Н. Ф. Пшеничного.

В докладах кандидата техн. наук, доц. А. Д. Свенчанского и кандидата техн. наук Н. М. Некрасовой были сообщены результаты проведенных в МЭИ им. Молотова работ по исследованию режима нагревателей и по нагреву сажки в электрических печах сопротивления, а также методика расчета нагревателей электрических печей сопротивления. В обзорных докладах доктора техн. наук А. В. Донского и кандидата техн. наук Д. С. Чукаева были охарактеризованы области применения и современные конструкции индукционных установок и электронагревательных приборов.

А. С.

Профессор А. М. Федосеев

К 50-летию со дня рождения и 25-летию научно-педагогической и инженерной деятельности

Алексей Михайлович Федосеев родился 19 июня 1904 г. в Харькове. В 1929 г. А. М. Федосеев отлично окончил Московское высшее техническое училище и поступил на работу в трест «Энергострой», реорганизованный затем в институт «Теплоэлектропроект», где он работает и в настоящее время руководителем Сектора релейной защиты и устойчивости.

В 1931 г. А. М. Федосеев был приглашен на педагогическую работу в Московский энергетический институт им. Молотова; в настоящее время — он профессор кафедры релейной защиты и автоматики. Алексей Михайлович успешно сочетает свою практическую инженерную работу в большой проектной организации с научной и педагогической деятельностью в одном из крупнейших вузов страны. Такое развитие научных и практических устремлений благоприятно сказалось на общем росте творческих способностей А. М. Федосеева.

Под руководством Алексея Михайловича сектор релейной защиты и устойчивости Теплоэлектропроекта выполнил большое количество оригинальных проектов по релейной защите и автоматике электрических систем Советского Союза, а также методических и типовых работ и инструктивных руководящих указаний, имевших большое значение при оснащении электрических систем технически совершенными устройствами релейной защиты и автоматики. В них был обобщен огромный опыт проектирования, эксплуатации и достижений советских заводов в области релестроения в условиях бурного роста энергетики страны.

И в настоящее время возглавляемый А. М. Федосеевым инженерный коллектив в тесном содружестве с заводами и другими организациями успешно ведет ответственные разработки и испытания сложных схем релейной защиты и автоматики для линии 400 кв Куйбышев—Москва.



Литературная деятельность Алексея Михайловича нашла свое выражение в ряде статей и научно-технических книг, написанных им лично и совместно с другими авторами. Эти труды способствовали дальнейшему развитию проблем релейной техники и воспитанию молодых специалистов. В вышедшей в 1953 г. книге А. М. Федосеева «Релейная защита энергосистем» обобщен опыт, накопленный в Советском Союзе за ряд лет. Эта книга получила заслуженно высокую оценку среди энергетиков.

Общественная деятельность А. М. Федосеева разнообразна — он работает: членом Технического совета Министерства электростанций, руководителем сектора по релейной защите Комиссии по дальним передачам при Академии наук СССР, членом редакционной коллегии журнала «Электричество».

Под руководством А. М. Федосеева выросло много высококвалифицированных инженеров. Благодаря чуткому отношению к людям и вниманию ко всякой полезной мысли, Алексей Михайлович пользуется любовью коллектива, в котором он работает.

Многолетняя плодотворная инженерно-техническая, научно-педагогическая и общественная деятельность Алексея Михайловича Федосеева высоко оценена Советским правительством, удостоившим его в 1947 г. почетного звания лауреата Сталинской премии за участие в разработке моделей электрических систем. А. М. Федосеев награжден орденом Трудового Красного Знамени, орденом Знак Почета и медалями Советского Союза.

**А. Н. НЕКРАСОВ, И. А. СЫРОМЯТНИКОВ,
М. Г. ЧИЛИКИН, И. И. СОЛОВЬЕВ,
А. А. ГЛАЗУНОВ, Л. И. СИРОТИНСКИЙ,
Ф. Д. ИВАНИЩЕНКО,
В. А. ВЕНИКОВ, А. Н. ЧЕТВЕРИЧЕНКО и др.**

Профессор А. Я. Тер-Хачатуров

К 70-летию со дня рождения и 45-летию инженерной и педагогической деятельности

12 июня 1954 г. Грузинский политехнический институт им. Кирова и Грузинское отделение ВНИТОЭ отметили юбилей проф. А. Я. Тер-Хачатурова.

Артемий Яковлевич Тер-Хачатуров родился в 1884 г. в г. Нухе (Азербайджанская ССР). Среднее образование он получил в Баку. В 1907 г. он закончил Дармштадтский политехникум (Германия). До 1911 г. А. Я. Тер-Хачатуров работал на нефтяных промыслах Баку, а затем переехал в Тбилиси, где начал работать на крупной по тому времени городской электростанции. Благодаря организаторским способностям Артемий Яковлевич быстро выдвинулся и возглавил общество по электрификации Тбилиси.

В 1924—1930 гг. А. Я. Тер-Хачатуров работал главным инженером Тбилисского трамвая, участвуя в его восстановлении и реконструкции.

А. Я. Тер-Хачатуров был инициатором, руководителем проекта и главным инженером строительства Тбилисской тэц. Ему принадлежит инициатива организации первого Закавказского научно-исследовательского института (ныне ТНИСГЭИ). За прошедшие годы при непосредственном участии А. Я. Тер-Хачатурова был выполнен ряд важных научно-исследовательских работ.

С 1924 г. Артемий Яковлевич ведет педагогическую работу, являясь одним из пионеров высшего электротехнического образования в Грузии. Им составлены и изданы учебники по электрическому освещению, электроприводу и



распределению электроэнергии в сетях. Эти учебники были большим подспорьем при подготовке в Грузии инженеров-электриков.

В 1926 г. А. Я. Тер-Хачатуров был утвержден доцентом, а в 1932 г. профессором и заведующим кафедрой электрических станций, которую он возглавляет до настоящего времени.

За заслуги в области энергетики Верховный Совет Грузинской ССР в 1944 г. присвоил А. Я. Тер-Хачатурову почетное звание заслуженного деятеля науки и техники Грузинской ССР.

Артемий Яковлевич принимает активное участие в общественной жизни: он состоял членом президиума Республиканского комитета профсоюзов и МБИТ и несколько раз избирался депутатом Тбилисского Совета депутатов трудающих.

Правительство высоко оценило труды М. Я. Тер-Хачатурова, наградив его орденом Трудового Красного Знамени и медалью «За доблестный труд в Великой отечественной войне».

В настоящее время А. Я. Тер-Хачатуров работает над созданием большого труда «Оптимальная структура систем горных энергетических районов».

**А. С. ХАЧАТРЯН, Ю. Г. АБАДЖЕВ,
Т. Л. ЗОЛОТАРЕВ, В. С. КОНДАХЧАН,
Г. И. АТАБЕКОВ, Н. В. ГАБАШВИЛИ, Г. А. СИСОЯН,
Г. К. МАХАРАДЗЕ, А. В. ВОРОНИН,
С. М. ГОРТИНСКИЙ, А. Н. КАРСАУЛИДЗЕ и др.**

К ЧИТАТЕЛЯМ

1 июля 1955 г. исполняется 75 лет со дня выхода первого номера журнала „Электричество“—одного из первых научных электротехнических журналов мира.

Редакция журнала „Электричество“ обращается с просьбой к читателям, к организациям, к электротехнической общественности страны, в распоряжении которых имеются материалы (воспоминания, фотографии и т. п.), представляющие интерес в связи с указанной датой и характеризующие деятельность журнала „Электричество“ как за дореволюционный период, так и за время после Великой Октябрьской социалистической революции или освещдающие отношение к журналу выдающихся деятелей науки и техники XIX и XX в., предоставить такие материалы для опубликования или на время для использования редакцией.

**Редакционная коллегия
журнала „Электричество“**

Библиография

**А. А. АКОПЯН, Г. В. БУТКЕВИЧ, Л. Ф. ДМОХОВСКАЯ, Е. С. КУХАРКИН,
Г. А. ЛЕБЕДЕВ, Д. В. РАЗЕВИГ, А. С. СЕРГЕЕВ, Л. И. СИРОТИНСКИЙ.
ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ. ч. I, под общей редакцией Л. И. Сиротинского. 292 стр., ц. 17 руб. Госэнергоиздат. 1951.**

А. В. АЛМАЗОВ, П. В. БОРИСОГЛЕБСКИЙ, С. С. ГОРОДЕЦКИЙ, Л. Ф. ДМОХОВСКАЯ, А. В. ПАНОВ, Л. И. СИРОТИНСКИЙ. ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ. ч. II, под общей редакцией Л. И. Сиротинского. 240 стр., ц. 11 руб. 50 коп. Госэнергоиздат, 1953.

**Допущено МВО в качестве учебника для энергетических
и электротехнических вузов и факультетов.**

Быстрое развитие электротехнической промышленности и энергосистем Советского Союза и перевод на более высокий уровень рабочих напряжений электроустановок требуют многочисленных и высококвалифицированных инженерных кадров. Научная подготовка инженера-электрика в вузе определяется усвоением им теоретических основ электротехники и техники высоких напряжений. Наличие хорошего учебника по технике высоких напряжений имеет важное значение для подготовки таких кадров.

Авторы рецензируемых книг поставили себе целью переработать предыдущее издание в соответствии с современным состоянием этой области техники и, общими требованиями, предъявляемыми к учебнику для вузов. С поставленными задачами авторы справились. Вместе с тем необходимо отметить, что изложение некоторых вопросов вызывает замечания.

Недостаточная согласованность отдельных разделов в книге приводит к повторному рассмотрению одних и тех же тем, к чрезмерной самостоятельности отдельных глав, что лишает книгу цельности учебника. Например, распределение напряжения вдоль оси изоляционных конструкций разбирается применительно к каждому виду изолятора (гл. 2 и 3, ч. II). Общие принципы конструирования изоляции лучше было бы рассмотреть отдельно, в общем виде, а затем уже распространить их на различные виды изоляции. Конкретные меры по выравниванию распределения напряжения описываются в обеих частях книги: на стр. 131, ч. I и стр. 40—41, 44, 61—62, 187—188 ч. II, а общие научные положения по этому вопросу не даются. Вопросы прочности бумажно-масляной изоляции излагаются на стр. 78—82 в гл. 3 о высоковольтных конденсаторах, на стр. 112—115 в гл. 4 о высоковольтных кабелях и в других разделах ч. II книги. Применительно к отдельным видам изоляционных конструкций разбирается прорыв масла в гл. 2, 3, 4, 6 и 7 ч. II. Очевидно, что вопросы прочности масла и маслопропитанной бумажной изоляции являются общими как для конденсаторов, проходных изоляторов и кабелей, так и для силовых трансформаторов. Поэтому при современном уровне знаний следовало бы изложить эти вопросы сначала в общем виде, а затем уже пользоваться ими при расчете изоляции.

Недостаточно строгая система изложения может быть проиллюстрирована и такими примерами. В гл. 10 ч. I дается описание внутреннего экрана в изоляторе, которое затем повторяется в гл. 2, ч. II с небольшими добавлениями. Однако после двукратного освещения этого вопроса остается неясным, почему разрядное напряжение по изолятору при наличии экрана уменьшается при отрицательной полярности импульса. Фиг. 2-35, приведенная в ч. II книги, повторяет фиг. 10-9 из ч. I книги. § 10-4 ч. I, имеющий непосредственное отношение к разряду по гирлянде изоляторов, который, следовательно, должен рассматриваться в главе об изоляторах, включен в главу о поверхностном разряде.

Усвоение предлагаемого в гл. 2, 4 и 5 ч. II материала затрудняется вследствие того, что отсутствует единая классификация кабелей и изоляторов; не дано научного определения термина «изолятор». Нет научного определения термина «стриммер» и ряда других. В гл. 20 ч. I не дается классификации испытательных трансформаторов по виду изоляции (масляная, воздушная, газовая под давлением). В гл. 22 ч. I не дается

классификации генераторов импульсных напряжений по типу конструкций. В гл. 23 следовало бы дать расчет схемы трансформатора Тесла. Изложение материала по конденсаторам следовало бы заключить приведением их сравнительных характеристик, указав направление развития конденсаторостроения, достигнутые возможности и рекомендуемые области применения каждого вида конденсаторов.

Обобщая материал, излагая общие закономерности явлений, можно было бы избежать распыления материала по отдельным разделам и значительно сократить объем книги. Методические достоинства книги как учебника при этом выиграли бы.

В то же время, стремясь сообщить как можно больше данных, авторы иногда излагают материал слишком лаконично, отчего увеличиваются трудности усвоения существа вопроса, а физическая сторона описываемых явлений ускользает. Например, стриммерная теория разряда в газах изложена не совсем полно и понятно; не ясно, почему в резко неравномерном поле стриммер распространяется от головки лавины к ее основанию. Приведенная на стр. 74 ч. I формула Горева-Машкилайсона, являющаяся математическим выражением вольт-секундной характеристики воздушного промежутка, не может быть применена, так как в книге не указано, как определять постоянные, входящие в формулу. Метод А. С. Зингермана для перехода от вольт-секундной характеристики, снятой при любой форме волны, к вольт-секундной характеристике, относящейся к прямоугольной волне, изложен схематично; физическая сторона его не раскрыта.

В гл. 6 не дается описания ступенчатого и строболидного лидеров, не приводятся данные о скорости распространения главного разряда. Следовало бы привести несколько практических примеров о величинах убытков, причиняемых молнией народному хозяйству вообще и электротехническому оборудованию в частности.

§ 21-1 «Выпрямители» гл. 21 написан слишком кратко, что не соответствует степени важности этого вопроса. Следовало бы привести наиболее употребительные схемы выпрямления высокого напряжения. В § 21-2 не разъяснено, почему газовые вентили требуют меньшей мощности на нагрев. В § 21-3 отсутствует классификация существующих типов электростатических генераторов, не даются их достоинства и недостатки, области их применения и перспективы развития. Здесь же полезно было бы описать цикл работы электростатического генератора, дать элементы расчета генератора с примером расчета.

Неоправдана попытка изложить вопросы перенапряжений в небольшой гл. 1 ч. II. В предлагаемом материале студенту будет трудно разобраться. Необходимо было сосредоточить внимание на опасности тех или иных перенапряжений для изоляции и ограничиться сообщением об амплитудах перенапряжений, их виде, вероятности их появления, имеющихся мерах защиты, облегчающих работу изоляции. Таким образом, можно сократить главу до объема параграфа. При рассмотрении же вопроса о координации изоляции следовало бы указать, что именно в этом вопросе уже решено и какие затруднения еще остались.

Отдельные вопросы в книге рассмотрены излишне подробно. Так, описание только одного импульсного искателя повреждений ИЛ-1 в гл. 10 ч. II дается на семи страницах. Изложение следовало бы сократить: ограничиться

блок-схемой, принципом работы и техническими параметрами прибора. Большое число (свыше трех десятков) экспериментальных кривых по Панову и Мравяну (гл. 6 и 7, ч. II), посвященных выяснению важных деталей электрической прочности масла в практических конструкциях, в общем курсе с успехом могут и должны быть опущены. Непонятны причины излишне подробного описания технологии изготовления конденсаторов в гл. 2 ч. II. Возникает вопрос, почему технология изготовления кабеля или изолятора не описывается так же подробно.

В гл. 5 отсутствует сопоставление характеристик и классификация кабелей. Не указано, почему плоский маслонаполненный кабель применяется только до 154 кв (стр. 130). Не приведены конструкции современных высоковольтных кабелей, изготавляемых отечественными заводами, и кабелей с винилитовой и алюминиевой оболочкой — ВРГ и АГ.

Из описания недостатков кабелей с поясной изоляцией (стр. 116) неясна причина образования газовых включений. Необоснован переход к конструкции кабеля типа ОСБ, не обоснованы его основные преимущества перед кабелем типа Н (стр. 117).

В разделе об испытаниях кабелей (§ 5-5) материал изложен бессистемно. Непонятно, почему речь идет о контрольных и дополнительных, а не о типовых и текущих испытаниях. На вопросах технологического контроля за изготовлением кабелей можно было не останавливаться.

На стр. 141 ч. II ошибочно указано, что испытания кабелей производятся на отрезках кабелей длиной 5...15 мм.

В книге отсутствует освещение новейших данных о проходных изоляторах на 400 кв, об испытательных трансформаторах с газовым (фреон, элегаз) наполнением под давлением, о вакуумных выпрямителях на 220 и 400 кв. Не используются данные и опыт эксплуатации линий электропередачи на 380 кв и опытных участков линий на 500 кв. В справочном материале (приложение к ч. II) отсутствуют данные об изоляторах П-11 и о гирлянде на 400 кв, о распространенном в настоящее время опорном изоляторе СО-35, о типовых и контрольных испытаниях изоляторов. В разделе III ч. I отсутствует материал по устройству современных высоковольтных лабораторий, в котором учитывалась бы отечественный и заграничный опыт. Кстати, отметим, что в книге не указаны авторы, написавшие раздел III.

К методическим недостаткам учебника относится неполное или одностороннее рассмотрение отдельных вопросов. Так, в разделе «поверхностный разряд в равномерном поле» (гл. 10, ч. I) авторы объясняют снижение разрядных напряжений влиянием влаги и не учитывают самих свойств твердого диэлектрика (ϵ, ρ). В гл. 19 ч. I приведена схема осциллографа с импульсной подачей напряжения на катод; преимущества импульсного метода питания электронно-лучевой трубы не указаны.

В гл. 22 ч. I наряду с рассмотрением процессов заряда и разряда контура ГИН для более полного усвоения данного материала желательно было бы дать конкретный числовой пример определения постоянных контура для заданной формы волны τ_{ϕ}/τ_{ρ} . В этой главе отсутствует указание на факторы, влияющие на регулярующую работу ГИН. Следовало бы выделить отдельный параграф о конструкциях ГИН, изложив его в следующей последовательности: а) одноконденсаторные; б) лестничные; в) этажерочные и г) колонковые ГИН и указать преимущества, недостатки и области применения различных конструкций.

Вызывает возражение толкование отдельных вопросов в книге. Так, следует указать, что механическая прочность изолятора зависит не только от конструкции изолятора, но и от прочности фарфора.

Сомнительна линейная зависимость электрической прочности фарфора от толщины, изображенная на фиг. 2-1. Не сказано о зависимости электрической прочности фарфора от пористости, о коронировании арматуры и определении коронного напряжения изоляторов.

Указание на то, что в конденсаторах на переменном токе наибольшая ионизация происходит в прослойках мас-

ла у краев обкладок (стр. 78, ч. II), противоречит литературным данным (Электричество, № 12, 1953, стр. 55). Наибольшая ионизация происходит в морщинках изоляции и других местах, где имеются толстые прослойки масла.

Влияние температуры на электрическую прочность масла и маслопропитанной изоляции освещено недостаточно и местами неправильно. Максимум электрической прочности масла лежит в области не положительных 60...80°C (стр. 150), а отрицательных температур.

Служба изоляции в условиях низких температур весьма интересует энергетиков северо-востока. В настоящее время имеются материалы, освещющие эти вопросы; их следовало бы изложить в учебной литературе.

Неправильно изложена теория потерь на корону, предложенная А. М. Залесским. Автор теории указывал, что в четвертой стадии полупериода (а не «периода», как дано в книге) «напряжение источника снижается до нуля», а в пятой стадии напряжение источника (обратной полярности по отношению к коронирующему электроду) возрастает до критического значения U_0 . В книге же написано: «В четвертой и пятой стадиях напряжение источника снижается до нуля». В книге встречаются некоторые неточные определения и ошибки. На стр. 141 ч. II, сказано: «Запас электрической прочности определяется отношением предельной прочности к рабочему напряжению». Здесь пробивная прочность, т. е. напряженность поля, при которой происходит пробой, смешивается с пробивным напряжением. Формула (4-22) ч. I записана в виде:

$$E_1 = \frac{q\alpha \cdot e^{\alpha x}}{3\pi^2 \epsilon r^2}$$

вместо

$$E_1 = \frac{q\alpha \cdot e^{\alpha x}}{3\pi \epsilon r}.$$

В подписи к фиг. 4-7 гл. 4 неправильно указано, что L_1 и L_2 — никели; очевидно, L_1 и L_2 — линзы, а N_1 и N_2 — никели.

Терминология и употребляемые в книге условные обозначения не встречают возражений, за небольшим исключением. Так, изоляция жил у кабелей с поясной изоляцией называется то фазной, то жильной. Термин «перевернутая схема моста» употребляется рядом с термином «поворнутая схема моста».

В целом книга написана литературным языком, однако в отдельных местах встречаются неудачные выражения. Например, на стр. 94 ч. II написано «комплектование» вместо «комплектование», на стр. 7 ч. II — «неупорядоченная конкуренция» и др. Нельзя признать удачными фразы: «Измерительные штанги отличаются от контрольных наличием устройства, позволяющего под напряжением управлять расстоянием между электродами, что дает возможность, сближая электроды, определять для каждого элемента и имеющегося на нем напряжение» (стр. 219, ч. II) и «Отрицательные фигуры образованы тонкими прямыми линиями с слабо намеченными расплывчатыми краями, чем больше скорость подъема, тем больше число нитей» (стр. 180, ч. I).

Несмотря на отмеченные недостатки, рецензируемые книги представляют собой содержательный учебник с большим фактическим экспериментальным и теоретическим материалом. В этом сказывается большая работа коллектива авторов и редактора книг Л. И. Сиротинского.

Доктор физ.-матем. наук, проф. А. А. ВОРОБЬЕВ, кандидат техн. наук, доц. Н. И. ВОРОБЬЕВ, инженеры М. Н. ТРЕСКИНА, Г. А. ВОРОБЬЕВ, И. И. КАЛЯЦКИЙ, А. М. ТРУБИЦЫН, В. С. ДМИТРЕВСКИЙ, А. Ф. КАЛГАНОВ, В. Д. КУЧИН.

Кафедра техники высоких напряжений и кафедра электроизоляционной и кабельной техники Томского политехнического института им. Карова

ОТВЕТ АВТОРОВ И РЕДАКТОРА

Коллектив авторов рассматриваемого учебника при работе над книгой встретился с рядом серьезных трудностей, которые полностью не удалось преодолеть. Книга не свободна от недостатков, и поэтому авторы приветствовали бы всякий критический разбор книги, способствующий ее улучшению и усилению методики преподавания техники высоких напряжений.

К сожалению, в рецензии работников Томского политехнического института не рассматривается достаточно подробно содержание отдельных глав книги, но зато она содержит критические замечания, слабо подкрепленные взятыми из разных мест преимущественно мелкими примерами.

Прежде всего следует отметить коренное расхождение мнений авторов книги и рецензентов по методике изложения раздела о высоковольтной изоляции. Рецензенты предлагают «вопросы прочности масла и маслопропитанной бумажной изоляции» изложить «сначала в общем виде», а затем использовать этот материал при разборе различных практических типов изоляции. Авторы учебника убеждены, что в настоящее время такие обобщения едва ли возможны. Изоляционные конструкции создаются в результате учета технических и электрофизических данных, преимущественно экспериментальных. Один и тот же материал (в частности, маслопропитанная бумага) работает в столь различных условиях и столь разнохарактерных конструкциях, что «обобщения» легко соскользнули бы на маслосодержательные общие места и могли бы привести к полному выхолаживанию технического содержания книги. Кафедра ТВН МЭИ старалась приблизить материал книги к практике, сделать его достаточным для углубленного изучения предмета и полезным молодому инженеру на первых шагах его практической работы. С этой целью к составлению учебника, помимо преподавателей кафедры, были привлечены специалисты в соответствующих областях, которым в некоторых случаях для помещения ценного материала представлялась возможность выходить за рамки учебного плана.

Рецензенты пишут: «Большое число (свыше трех десятков) экспериментальных кривых по Панову и Мравян (гл. 6 и 7, ч. II), посвященных выяснению важных деталей электрической прочности масла в практических конструкциях, в общем курсе могут и должны быть опущены». Если учесть, что на этом материале базируется в основном практика расчета изоляции отечественных трансформаторов, станет совершенно очевидным, что стремление к «обобщениям» неминуемо приводит рецензентов к требованию отказа от технического содержания.

В гл. 10, ч. I учебника изучение основных закономерностей разряда по поверхности диэлектрика сопровождается несколькими примерами, взятыми из практики (опорный изолятор с экранировкой, гирлянда изоляторов). В дальнейшем некоторые из этих примеров используются в ч. II при описании изоляционных конструкций, но уже с другой точки зрения. Совершенно непонятно, почему этот естественный прием позволяет рецензентам упрекнуть авторов в «отсутствии строгой системы изложения».

Рецензенты утверждают, что «Усвоение предлагаемого в гл. 2, 4 и 5 ч. II материала затрудняется вследствие того, что...», и далее в одном коротком абзаце они касаются кабелей, изоляторов, стримеров, испытательных трансформаторов, генераторов импульсных напряжений, трансформатора Тесла и конденсаторов. Едва ли такое беглое перечисление можно рассматривать как подтверждение наличия в учебнике методических недостатков, затрудняющих усвоение материала.

Еще через абзац рецензенты утверждают, что материал книги в ряде случаев излагается излишне лаконично, из-за чего, по их мнению, «увеличиваются трудности усвоения существа вопроса, а физическая сторона описываемых явлений ускользает». В качестве примеров указывается на изложение стримерной теории, упоминаются формула Горева—Машкилайсона и метод А. С. Зингермана. Авторы согласны, что раздел книги, посвященный далеко еще не законченной стримерной теории, не свободен от недостатков. Авторы пришли к выводу, что в следующем издании книги, если оно потребуется, все главы, посвященные газо-

вому разряду, необходимо будет сильно сократить, сделав изложение более практическим. В частности, работы последних лет потребуют переработки изложения метода А. С. Зингермана. Что касается формулы Горева—Машкилайсона, то в книге четко указано, что постоянные определяются экспериментально. Отсутствие таблиц постоянных отнюдь не исключает полезности этой простой и наглядной формулы.

В трех абзацах рецензии, посвященных кабелям, верно только то, что кабели с винилитовой и алюминиевой оболочкой не рассматривались, чего, по мнению авторов, и не следовало делать. Рецензенты сочли необходимым отметить допущенную в книге опечатку: — конечно, испытания кабелей производятся на отрезках кабелей длиной не 5...15 мм, а 5...15 м.

Рецензенты без достаточных оснований отмечают отсутствие в книге новейших данных о проходных изоляторах 400 кв, об устройстве современных лабораторий и т. д. Все возможное по этим вопросам в книге опубликовано.

Рецензенты пишут: «К методическим недостаткам учебника относится неполное, а подчас и одностороннее рассмотрение отдельных вопросов». Это замечание аргументировано очень слабо: в разделе книги, посвященном поверхностному разряду, влияние ϵ учтено, а влияние ρ еще недостаточно изучено и экспериментальные материалы противоречивы. Соображения М. И. Мантрова по этому вопросу изложены на стр. 129.

По расчету ГИН в книге приводятся указания и дана расчетная номограмма, но возможно, что числовой пример действительно был бы полезен. Непонятно, какие «факторы, влияющие на регулярную работу ГИН» имеют в виду рецензенты.

Почему рецензенты говорят о сомнительности линейной зависимости электрической прочности фарфора от толщины, изображенной на рис. 2-1, и какой она должна быть?

По разделу конденсаторов рецензенты ссылаются на интересную статью в журнале «Электричество», но она появилась в печати после опубликования нашей книги.

В связи с замечанием по вопросу о влиянии температуры на прочность трансформаторного масла необходимо учесть, что сведения на стр. 150 не распространяются на диапазон весьма низких температур.

Рассматривая обширную главу книги о коронном разряде, рецензенты указывают только на, якобы, неправильное изложение теории А. М. Залесского. Возможно, что краткое изложение этой теории в книге не свободно от недостатков, но авторы полагают, что сущность названной теории изложена ими правильно.

Перечисляя некоторые неточности и ошибки, рецензенты указывают на три примера. Фраза на стр. 141 ч. II об отнесении электрической прочности к рабочему напряжению вызвала замечание рецензентов о, якобы, «смешении напряженности с напряжением». Между тем из контекста ясно, что прочность в данном случае характеризуется именно пробивным напряжением; при оценке изоляционных конструкций такое понимание прочности вполне возможно.

Справедливо указывая на неправильную запись формулы (4—22), рецензенты не добавляют, что эта коррекция ошибки легко устранима, поскольку формула (4—22) вытекает из простой подстановки здесь же записанных простых и правильных выражений Q и N .

И, наконец, рецензенты отметили совершенно очевидный для читателя недосмотр корректора в подписи к фиг. 4—7; причем замечание по этому поводу изложено в такой форме, будто это не опечатка, а смешение линз с николями авторами книги.

В заключение отметим, что многие недостатки книги выясняются в процессе практической работы и авторы будут признательны читателям, если они своей суповой критикой окажут содействие дальнейшей работе авторов над учебником.

А. А. АКОПЯН, П. В. БОРИСОГЛЕБСКИЙ,
Ю. В. БУТКЕВИЧ, Л. Ф. ДМОХОВСКАЯ,
Д. В. РАЗЕВИГ, Л. И. СИРОТИНСКИЙ

И. Я. РЫШКОВСКИЙ и К. Г. КУЧМА. ТЯГОВЫЕ ПОДСТАНЦИИ. 487 стр.,
ц. 13 руб. 20 коп. Трансжелдориздат, 1953.

Дальнейший технический прогресс в области электрификации железнодорожного транспорта требует расширения подготовки специалистов по проектированию, монтажу и эксплуатации устройств электроснабжения электрических железных дорог. Роль среднего технического персонала во всех этих областях достаточно велика и ответственна. Однако подготовка техников-электриков до сих пор затруднена вследствие отсутствия хорошего и краткого учебника по профилирующему курсу тяговых подстанций в части устройств постоянного тока.

Последовательность расположения материала в книге в общем соответствует учебной программе техникумов. Значительное количество иллюстраций, достаточно ясный язык авторов, а также хорошее внешнее оформление учебника делают его, безусловно, удобным для использования не только учащимися техникумов, но и широким кругом эксплуатационного персонала тяговых подстанций, не имеющего специального образования. В ряде вопросов книга принесет пользу и студентам высших учебных заведений.

Наиболее существенным, на наш взгляд, из имеющихся в книге недостатков следует считать проявленное авторами учебника стремление охватить в нем весь круг вопросов, связанных с электрической частью тяговых подстанций. При выпуске учебника авторам и Трансжелдориздату следовало считаться с почти одновременным выходом в свет значительно большим тиражом (50 000 экз.) второго издания учебника по электрооборудованию электрических станций и подстанций Л. Н. Балтийданова и В. И. Тарасова, предназначенному для энергетических техникумов и известного своими методическими достоинствами.

Попытка авторов охватить в одной книге все вопросы, составляющие предмет нескольких больших отдельных курсов, привела к поверхностному и недопустимо упрощенному для учебника изложению некоторых важных разделов, например о токах короткого замыкания и о релейной защите.

Наряду с таким снижением теоретического уровня материала указанных разделов авторы необоснованно усложнили изложение других вопросов (например, слаживающих устройств), а в некоторых случаях вышли за пределы объема, предусмотренного программой курса техникумов.

Остановимся на отдельных главах книги.

Во введении дан краткий исторический очерк развития электрификации СССР. Говоря о перспективах развития энергетики в пятом пятилетии (стр. 6), авторы упомянули лишь об использовании р. Ангары и умолчали о более близких к осуществлению и также весьма важных для народного хозяйства гидростанциях — Стalingрадской и Каховской.

Вторая часть исторического очерка, посвященная развитию электрификации железных дорог СССР, написана слишком конспективно и не открывает перед читателем дальнейших перспектив развития новой техники; так, авторы ни словом не обмолвились о предстоящем освоении системы электрической тяги на однофазном токе нормальной частоты.

В гл. 2 (стр. 17—49) рассматривается режим короткого замыкания в системах переменного тока. В гл. 3 (стр. 50—121) изложены вопросы, относящиеся к аппаратуре и токоведущим частям подстанции. Методически было бы правильно начинать эту главу с описания назначения аппаратуры, применяемой на тяговых подстанциях, и ее основной номенклатуры, а не прямо с процесса гашения дуги в отключающих аппаратах. Объяснение физической стороны процесса гашения дуги переменного тока (стр. 51) было бы полезно в целях наглядности проиллюстрировать соответствующими кривыми.

Гл. 4 «Защита от коротких замыканий и других ненормальных режимов» (стр. 122—163) неправильно наименована; короткие замыкания являются причиной возникновения аварийных, а не ненормальных режимов и потому слово «других» в названии главы неуместно. Содержащееся в этой главе утверждение (стр. 125), будто реле прямого действия применяются лишь на установках малой мощности, неправильно. В связи с расширением области применения защиты на переменном оперативном токе такое без-

апелляционное утверждение может дезориентировать читателя.

Принимая во внимание общий объем и уровень изложения авторами вопросов релейной защиты, рассмотрение типов реле проведено в книге с излишней подробностью, далеко не всегда способствующей пониманию предмета.

Безоговорочное утверждение о ненужности специальной защиты от однофазных коротких замыканий в сетях с большими токами замыкания на землю, сделанное на стр. 143, неверно, так как такая защита в значительном числе случаев оказывается необходимой и широко применяется. Из текста на той же странице учащийся узнает, что для максимальной токовой защиты применяются схемы в трехфазном или двухфазном исполнении, однако он остается в неведении о причинах такой возможности. Приведенная вслед за этим на фиг. 128 (стр. 145) схема включения реле на разность токов двух фаз остается не разъясненной простейшей векторной диаграммой и, конечно, не будет понята учащимися.

Описание максимальной токовой защиты с ограниченновозависимой характеристикой и с применением реле типа ИТ-80 сделано на стр. 147 так, что заставляет читателя вообще усомниться в рациональности использования этих реле. О достоинствах реле этого типа ничего не сказано.

Не сказано ничего также и о способах обеспечения достаточной чувствительности защиты при минимальных режимах энергосистемы, хотя это требование для тяговых установок часто оказывается трудно выполнимым.

Вряд ли целесообразно было излагать устройство дистанционных защит в том виде, как это сделано в данном учебнике. Приведенные на фиг. 134, а и б схемы этих защит не разъясняют принципа их действия. Объяснение устройства дифференциальной защиты (стр. 154) не дает представления о работе наиболее распространенной схемы с циркулирующими токами. Примененное в конце той же страницы неудачное выражение «для последовательного циркулирования тока» не восполняет этого пробела изложения.

На стр. 161 сделано подразделение силовых трансформаторов по мощности на малые, средние и большие. Это разграничение неточно.

Подробное рассмотрение глав 2, 3 и 4 приводит к выводу о том, что в настоящем своем виде они вряд ли могут оказаться полезными как основной учебный материал для учащихся на любой стадии их обучения (в техникуме или втузе).

В гл. 5 (стр. 164—180) весьма конспективно изложены вопросы, относящиеся к распределительным устройствам переменного тока высокого напряжения.

Предметом изложения гл. 6 (стр. 181—204) являются распределительные устройства постоянного тока. К названию главы следовало бы по аналогии с гл. 5 добавить слова: «высокого напряжения». Более подробно следовало остановиться на выборе полярности системы шин, учитывая коррозию подземных сооружений от буждающих токов и соображения безопасности обслуживания.

На стр. 196—200 излагается защита тяговой подстанции и контактной сети от токов короткого замыкания в последней при помощи быстродействующих выключателей и методом вольтметровой блокировки, подробно разобранной и поясненной схемой на фиг. 177. О существовании других видов защиты, например устройств, реагирующих на изменение тока и напряжения, короткозамыкателей, постов секционирования и др., авторы книги не упомянули вовсе.

Гл. 7 (заземляющие устройства) изложена достаточно понятно, но неполно, — не приведен расчет заземляющих устройств на термическую устойчивость в системах с большими токами замыкания на землю.

В гл. 8 (стр. 219—237) описываются собственные нужды тяговых подстанций. Следует отметить, что с методической точки зрения эту главу было бы более уместно расположить после изложения основных типов подстанций, т. е. после гл. 9 и 10, когда станет понятной работа основных агрегатов подстанции и их вспомогательного оборудования и когда уже будут изложены главные схемы коммутации.

Иначе ряд положений и схем и в том числе фиг. 193 (схема питания собственных нужд) остаются непонятными для неподготовленного читателя.

Гл. 9 под названием «Тяговые подстанции с ионными преобразователями» в соответствии с занимаемым ею местом в курсе, авторы уделили много внимания и отвели свыше 70 стр. (стр. 238—310). В ней достаточно подробно и на соответствующем назначению книги уровне описаны основные типы ионных преобразователей, применяемых на тяговых подстанциях электрических железных дорог. Эта глава по праву должна играть центральную роль в книге. Главу лучше было назвать: «Применение ионных преобразователей на тяговых подстанциях», так как приведенные в этой главе схемы во многом относятся также к подстанциям с другими преобразовательными агрегатами и эти схемы было целесообразно выделить в отдельную главу. К сожалению, в этой, в общем удачной, главе книги также имеются досадные упущения. Так, в описании на стр. 250 остаются непонятными назначение и работа устроителя частоты и трансформатора поворота фазы. Неуместно применение терминов «максимальное» и «среднее» значение пульсирующего тока применительно к току короткого замыкания (стр. 250).

Рассмотрению схем первичной коммутации тяговых подстанций в книге уделено совершенно недостаточное внимание. Этому вопросу отводится всего неполных 4 стр. (293—297). Правда, на фиг. 249 (вклейка в конце книги) приведена схема типовой подстанции, но это не восполняет недостатков изложения этого важного вопроса. К тому же в выборе системы шин авторы ориентируют главным образом на двойную систему (стр. 293 и фиг. 248, 249 и 250), что, как известно, далеко не всегда оправдывается технико-экономическими и эксплуатационными соображениями. При описании схем не приведено ни одного примера, в котором впервые изучающему предмет разъяснялась бы последовательность переключений. В результате назначение отдельных элементов схемы фиг. 249 остается непонятным (например, шиносоединительного масляного или запасного быстродействующего выключателя, стр. 294). Схема фиг. 263 слишком сложна, запутана и не способствует пониманию устройства подстанций с двигателем-генераторами. Вместе с тем ни здесь, ни где-либо в другом месте не упоминается об основных особенностях эксплуатации таких подстанций. Желательно было бы более подробное освещение тяговых подстанций переменного тока в гл. 11 (стр. 320—326), носящей описательный характер. Схема (фиг. 268) и план подстанции (фиг. 269) недостаточно четки вследствие мелкого масштаба, а изображенные на фиг. 271 и 272 схемы непонятны, так как их действие объяснено всего в пяти—шести строках.

В гл. 13 (стр. 331—387) рассмотрены вопросы управления и автоматизации тяговых подстанций. Не подвергая эту главу детальному рассмотрению, следует сказать, что область автоматизации подстанций изложена с подробностью, превосходящей рамки программы курса техникума. Вместе с тем аппаратуре автоматики, ее устройству и назначению уделяется меньше внимания, в результате чего упомянутые на стр. 355 термины «барреттор» и «стабилизатор» не будут поняты учащимися.

Описанию схем вторичной коммутации во всем широчайшем комплексе систем управления, предупредительной

и аварийной сигнализации отводится в этой большой главе ничтожный объем — всего 2 стр. с приведением лишь одной развернутой схемы защиты линии! На этой схеме применены обозначения реле, которые отличаются от условного изображения элементов схем и аппаратов, приведенных на стр. 128 рецензируемой книги. Можно согласиться с авторами учебника в том, что «до сего времени нет общепринятых условных обозначений приборов и аппаратуры» (стр. 335), но это вовсе не значит, что нельзя достичь единобразных обозначений в пределах одной книги.

Щиты управления, защиты и автоматики рассмотрены в книге также весьма поверхностно, о чем свидетельствует и объем материала (стр. 332—334).

Конструкции тяговых подстанций приводятся в гл. 14 (стр. 388—405). При изложении различных компонентов подстанций надо было произвести их сопоставление и указать, в каких случаях следует применять ту или иную из них. На фиг. 312 (вклейка в конце книги) и 313 (стр. 395) приведены устаревшие планы подстанций, не отвечающие современной тенденции к экономии кубатуры здания и длины контрольных кабелей. Эти фигуры, так же как и фиг. 314, перенесены в рецензируемый учебник из предыдущей книги одного из авторов — И. Я. Рыжковского «Тяговые подстанции», изданной еще в 1949 г.

Гл. 15 (монтаж тяговых подстанций) и 16 (техническая эксплуатация тяговых подстанций) существенно облегчат учащимся прохождение производственной практики. Конечно, они далеко не полны, но в рамках учебника общего курса тяговых подстанций этого нельзя и требовать.

В книге имеются редакционные недоработки и стилистически неудачные обороты речи. На стр. 24 в одном и том же предложении написано: «кроме случаев незатухания и затухания... возможны случаи сначала затухания...». На стр. 134 неудачно отредактирована фраза: «свое название такие реле получили вследствие наличия у них первичной и вторичной обмоток и процесса трансформации в время их действия». На стр. 250 в одном предложении сказано: «максимальное значение... достигает значения», а на стр. 276 говорится, что «преобразование тока... стало возможным после применения управляющих сеток». Примеры таких стилистических неудач можно было бы умножить.

Рецензируемая книга не свободна и от типографских опечаток.

Следует отметить, что многие перечисленные выше недостатки должны быть поставлены в упрек не только, а во многих случаях и не столько авторам учебника, сколько его редактору — кандидату техн. наук Р. И. Мирошниченко. При более внимательном отношении к рукописи и более тесном контакте между редактором и авторами в период подготовки книги к печати многие из отмеченных выше методических и стилистических упущений и шероховатостей могли быть избегнуты.

При переиздании книги авторам следует учсть сделанные здесь замечания, что позволит уменьшить объем учебника и повысить его качество.

**Кандидат техн. наук, доц. С. Д. ВОЛОБРИНСКИЙ,
инж. М. Н. ЗВЕЗДКИН**
Ленинградский институт инженеров железнодорожного транспорта



Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике

БОНЧ-БРУЕВИЧ А. М. ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ЛАМП В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКЕ. Изд. 2-е, переработ. 655 стр., ц. 24 руб. 10 коп. Гостехиздат.

БУТОРИН И. М. УЧЕТ ПРОИЗВОДСТВА И ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В КОЛХОЗАХ, 64 стр., ц. 1 руб. 30 коп. Госстатиздат.

ГАНТМАХЕР Ф. Р. ТЕОРИЯ МАТРИЦ, 429 стр., ц. 20 руб. 90 коп. Гостехиздат.

ЛЕВИН Л. СОВРЕМЕННАЯ ТЕОРИЯ ВОЛНОВОДОВ (методы расчета влияния неоднородностей). Пер. с англ. Э. Л. Бурштейна, 216 стр., ц. 12 руб. 15 коп. Изд. иностр. лит.

МАКСВЕЛЛ Д. К. ИЗБРАННЫЕ СОЧИНЕНИЯ ПО ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ. Пер. З. А. Цейтлин. Под ред. П. С. Кудрявцева, 688 стр., ц. 16 руб. 10 коп. Гостехиздат.

МАРИЙСКАЯ СТАНЦИЯ ПО ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СЕЛЬСКОГО И ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА. Сборник статей под ред. А. Е. Арбузова,

84 стр., ц. 5 руб. 25 коп. Иошкар-Ола. Изд. Казанского филиала АН СССР.

НАЛАДОЧНЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАБОТЫ. ТРЕСТ ОРГРЭС, вып. 8. 71 стр., ц. 4 руб. 50 коп. Госэнергоиздат.

РОЗАНОВ Г. М. НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ РАСЧЕТА МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ, 224 стр., ц. 10 руб. 45 коп. Госэнергоиздат.

РУКОВОДСТВО К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО КУРСУ «ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ». Под ред. А. А. Янко-Триницкого, ч. I, 64 стр. Уральский политехн. институт им. Кирова.

СМИРНОВ В. И. КУРС ВЫСШЕЙ МАТЕМАТИКИ, т. 3, ч. I, изд. 6-е, 340 стр., ц. 9 руб. 45 коп. Гостехиздат.

ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ ПРИ БОЛЬШИХ ЭНЕРГИЯХ. Сборник переводов, ч. 2. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ С ТЯЖЕЛЫМИ ЧАСТИЦАМИ. 292 стр., ц. 13 руб. 20 коп. Изд. иностр. лит.



Номограмма для решения уравнения четвертой степени

Уравнение четвертой степени общего вида

$$x^4 + Ax^3 + Bx^2 + Cx + D = 0 \quad (1)$$

подстановкой $x = u \sqrt[4]{D}$ приводится к форме

$$u^4 + au^3 + bu^2 + cu + 1 = 0, \quad (2)$$

где

$$a = \frac{A}{\sqrt[4]{D}}; \quad b = \frac{B}{\sqrt[4]{D}}; \quad c = \frac{C}{\sqrt[4]{D^3}}.$$

Указанный в схеме пользования порядок решения для простоты ограничен случаем, когда все четыре действительных корня определяются одним выравниванием; в этом случае все корни уравнения положительные. Если же при заданных значениях a и c , выполняя одно выравнивание, можно определить только два корня, то, меняя знаки у этих коэффициентов на обратные, находят третий и четвертый корни и присваивают им знак минус.

Числовой пример и его графическое решение, приведенные на номограмме, соответствуют указанному выше случаю: первое выравнивание, когда коэффициенты a и c берутся с их знаками, дает два положительных корня; при втором выравнивании, когда коэффициенты a и c берутся с обратными знаками, получаем третий и четвертый корни с отрицательным знаком.

Если данные значения коэффициентов a , b и c в уравнении

$$u^4 + au^3 + bu^2 + cu + 1 = 0$$

не укладываются в пределы соответствующих шкал или кривых номограммы, а также в случаях, когда значения корней и получаются в областях с недостаточной точностью отсчета, то вместо a , b и c берем значения a_1 , b_1 и c_1 , определяемые формулами

$$a_1 = \frac{a}{\lambda^3}; \quad b_1 = \frac{b}{\lambda^2}; \quad c_1 = \frac{c}{\lambda},$$

где λ — любое число, выбираемое так, чтобы коэффициенты a , b , c , а также корни уравнения u получались в пределах, данных на шкалах a и c , кривых b и вертикальных прямых u и номограммы. Обычно для удобства вычислений берут $\lambda = 10^k$. Тогда корни уравнения

$$u^4 + au^3 + bu^2 + cu + 1 = 0$$

будут:

$$u_1 = \lambda u_1'; \quad u_2 = \lambda u_2'; \quad u_3 = \lambda u_3'; \quad u_4 = \lambda u_4',$$

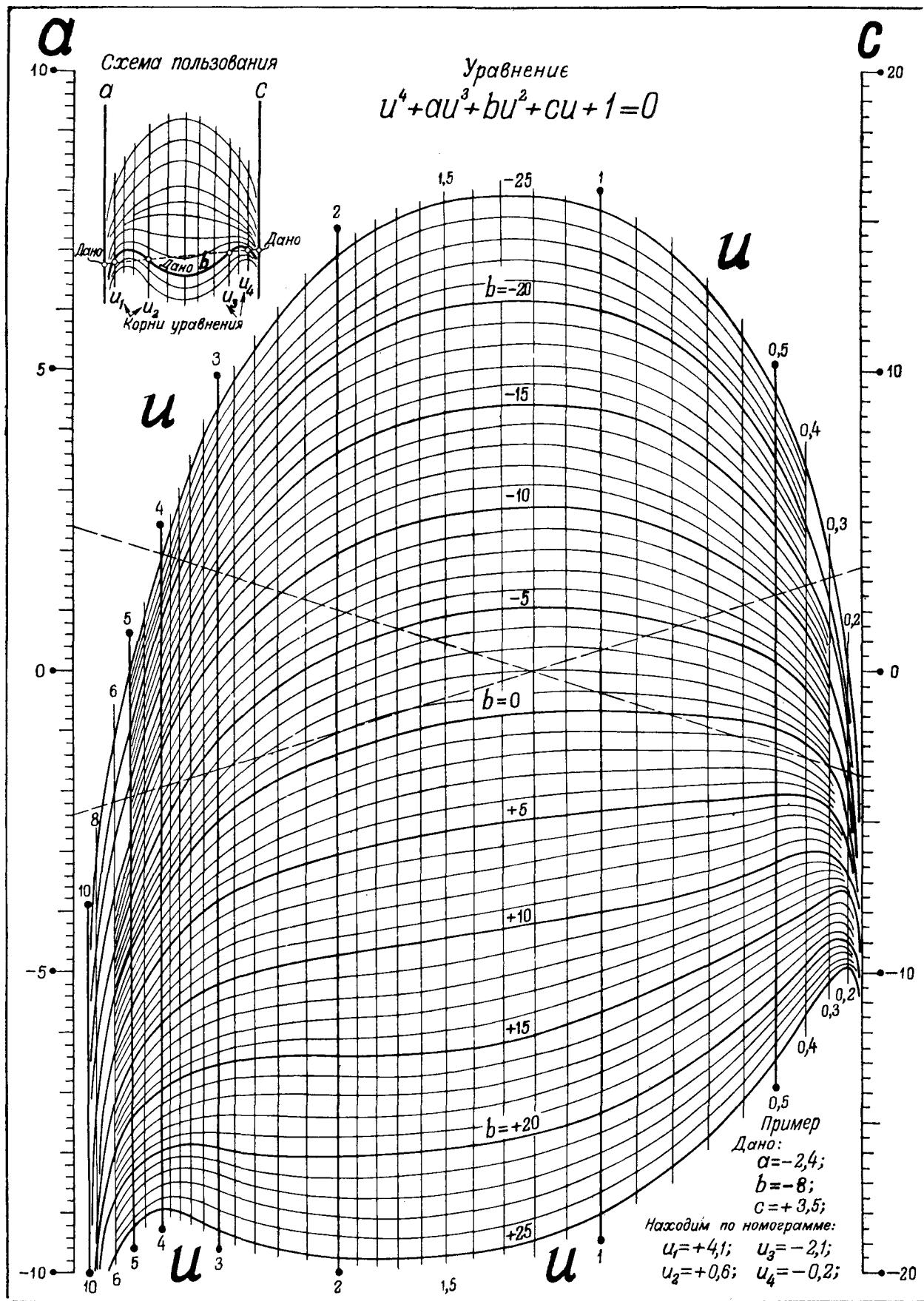
где u_1' , u_2' , u_3' и u_4' — значения корней, полученные по номограмме при коэффициентах a_1 , b_1 и c_1 .

Если, соединив точки на шкалах a и c прямой линией, мы не получим пересечения с помеченными прямыми u , то соответствующие корни комплексные.

Д. Е. ЛЕВИТ



НОМОГРАММА ДЛЯ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ЧЕТВЕРТОЙ СТЕПЕНИ



Составил Д. Е. Левин