ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1956

ГОССЭНЕРГОИЗДАТ

12

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Вопросы автоматизации в энергетике 1

Н. С. Климов — О перспективах дуговых вентилей и о механических выпрямителях 5

А. М. Пинцов — Расчет гармоник выпрямленного тока и напряжения 9

В. Н. Шестопалов — Определение на фазовой плоскости возможности ресинхронизации синхронного двигателя 15

Н. М. Масленников — Расчет анодных делителей тока 18

П. А. Ионкин — Об одном преобразовании нелинейных цепей 21

П. В. Сергеев — Вольтамперные характеристики электрической дуги постоянного и переменного токов 25

А. Е. Каплянский, Л. С. Полотовский, Н. Ф. Соколов и П. И. Петров — Гашение электрической дуги постоянного тока во вращающемся магнитном поле 29

Ю. А. Шмайн — Испытания и эксплуатация ионного возбудителя турбогенератора 3 000 *квт* 32

С. Ф. Березниковский — Реакция тока поперечной цепи якоря электромашинного усилителя . . . 35

Г. В. Могилевский — К расчету электромагнитов с внешним поворотным якорем 40

В. Н. Егоров — Удаление электростатических зарядов путем ионизации воздуха 43

В. С. Кравченко и **П. А. Фетисов** — Искробезопасность электрооборудования в атмосфере взрывоопасных смесей 48

Г. К. Нечаев — Термосопротивление как датчик температуры в схеме с логометром 52

Г. С. Вайнберг — Угол сдвига фаз в индукционной бессердечниковой электропечи 55

М. Г. Коган — Взаимное влияние процессов в электромагнитном и температурном полях при индукционном нагреве 59

ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ

В. А. Глебов — Экспериментальное исследование пусковых процессов асинхронных двигателей . . 63

ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Н. В. Мартинец — Работы С. П. Власова в области учения о гальванических элементах 68

ДИСКУССИИ

О применении схемы куметра для измерения малых добротностей — **А. И. Айзенштейн, А. В. Нетушил** 69

О технико-экономическом сравнении городских электрических сетей — **С. А. Кудряшов, В. А. Козлов, Б. Л. Айзенберг** 71

Неотложные задачи теории городских электрических сетей — **Ю. А. Гланс, Л. М. Фингер, С. Н. Никогосов, Н. И. Медведский, Н. В. Волоцкой, И. С. Бессмертный и Ф. Ф. Воронцов** . . . 73

ЗАМЕТКИ И ПИСЬМА

Об электротехнических нормах для горнодобывающей промышленности 78

ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ

Облегченные передвижные электрические станции. Защита и автоматическое повторное включение распределительных сетей. Новый роторный снегоочиститель для совместной работы с тепловозом. Применение электроэнергии в сельском хозяйстве 80

ХРОНИКА

Конгресс в Белграде в связи с юбилеем Теслы . . 88

А. А. Морозов 88

БИБЛИОГРАФИЯ

Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике 89

Указатель материалов, помещенных в журнале „Электричество“ в 1956 г 90

◇◇◇

Адрес редакции: Москва, К-12, Б. Черкасский пер. д. 2. Телефон К 4-24-80

Адрес для телеграмм: МОСКВА ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

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

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

КОММУНИЗМ—ЭТО ЕСТЬ СОВЕТСКАЯ ВЛАСТЬ
ПЛЮС ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ ВСЕЙ СТРАНЫ (Ленин)

ЖУРНАЛ
ОСНОВАН
в 1880 г.

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

12
1956
ДЕКАБРЬ

ОРГАН АКАДЕМИИ НАУК СССР, МИНИСТЕРСТВА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ СССР
И МИНИСТЕРСТВА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР

Вопросы автоматизации в энергетике

XX съезд Коммунистической партии Советского Союза в числе важнейших задач по дальнейшему развитию народного хозяйства СССР уделил большое внимание задачам механизации и автоматизации производственных процессов. Им посвящен специальный раздел Директив съезда. Всемерное повышение производительности труда наряду с его облегчением возможно лишь при подъеме технического уровня производства путем дальнейшего развития электрификации и внедрения механизации и автоматизации. Основной базой для электрификации всего народного хозяйства является энергетика. Опережающие темпы строительства электростанций и производства электроэнергии предусмотрены Директивами съезда.

Наиболее прогрессивным в техническом и экономическом отношениях является производство электроэнергии в энергетических системах. Здесь технические возможности, необходимость и экономическая целесообразность автоматизации и телемеханизации при наличии относительно очень высокой степени механизации, непрерывности, быстротечности и связанности процессов производства и распределения электрической энергии на больших пространствах особенно велики.

Создание и развитие крупных энергетических объединений и систем идет быстрыми темпами. Уже сейчас в СССР имеется ряд энергосистем с установленной мощностью, превышающей 1 млн. *квт*. В трех объединениях — Центральном, Южном и Уральском — общая мощность электростанций составляет по нескольку миллионов киловатт в каждом. В шестой пятилетке названные объединения будут соединены через Куйбышевскую и Сталинградскую гэс на параллельную работу. Совмещенный максимум единой энергосистемы Европейской части СССР достигнет к 1961 г. величины порядка 30 млн. *квт*.

Должны быть полностью автоматизированы не только все электростанции и подстанции энергосистемы, но и режимы их работы должны автоматически координироваться между собой с целью соблюдения оптимального режима работы объединенной энергосистемы в целом. Без применения автоматического регулирования и управления и соответствующих устройств телемеханики нельзя, разумеется, обеспечить надежную и тем более экономичную работу энергообъединения таких масштабов. С большими расстояниями приходится сталкиваться при автоматизации и телемеханизации не только энергосистем, но и железных дорог, дальних газо- и нефтепроводов, междугородной связи и т. д. Но ни в одной другой области нет таких скоростей распространения изменений режимов, как в энергетике, где от момента выработки электроэнергии до ее потребления даже при расстояниях в тысячи километров проходят всего тысячные доли секунды.

В области автоматизации, а также телемеханизации энергетических систем Министерства электростанций СССР уже осуществлены многочисленные и разнообразные работы. После практической проверки те из них, которые дали определенный эффект в части повышения надежности и экономичности эксплуатации электростанций и сетей, а также повышения производительности труда, внедрялись весьма широко как на действующих, так и на вновь вводимых в эксплуатацию установках. В результате был достигнут высокий уровень оснащения электростанций и сетей автоматикой. Так, например, автоматическое управление агрегатами было выполнено на всех гидростанциях уже к 1953 г.; время пуска агрегатов в итоге снизилось до 75 ... 90 *сек* против 4 ... 15 *мин* на ручном управлении, а численность дежурного персонала на гэс была уменьшена в 2,5 ... 3 раза. К началу 1956 г. уровень оснащения тепловых электростанций автоматическим регулированием процесса горения составил 77,4% общей паропроизводительности котельных, что по объему выработки 1955 г. соответствует годовой экономии в 240 тыс. *т* условного топлива. Соответственно уровень внедрения автоматических регуляторов питания составил 96%.

Внедрение указанных и ряда других устройств автоматики в тепловой части электростанций существенно сказалось на повышении культуры эксплуатации, снижении аварийности и облегчении труда.

Повсеместное внедрение автоматического регулирования и форсировки возбуждения на генераторах, синхронных компенсаторах и синхронных двигателях привело к повышению устойчивости

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

параллельной работы электростанций и улучшению условий восстановления напряжения после отключения коротких замыканий. На этой основе широкое применение нашли: включение генераторов в сеть способом самосинхронизации, простые схемы прямого пуска синхронных двигателей, самозапуск асинхронных двигателей, повышающий бесперебойность работы как электростанций, так и электроустановок потребителей электроэнергии.

Высокие показатели правильных действий имеет релейная защита. Устройствами автоматического повторного включения оснащены свыше 90% линий электропередачи всех напряжений, включая 6 ... 10 *кв*, и соответственно 95% линий напряжением 35 *кв* и выше. Для характеристики работы электроавтоматики в системе Министерства электростанций можно отметить, что только за 1955 г. в энергосистемах было свыше 6 500 случаев восстановления передачи мощности по линиям и электроснабжения на станциях и подстанциях благодаря действию устройств автоматического повторного включения и автоматического включения резерва.

Около 200 подстанций за годы пятой пятилетки переведено на телеуправление.

На основе внедрения автоматики, дополняемой в некоторых случаях телемеханикой, и усовершенствования организации эксплуатации за последние 2 года получил распространение перевод подстанций на обслуживание без постоянного дежурства персонала. В настоящее время уже около 60% подстанций энергосистем работают без круглосуточных дежурств, взамен которых осуществлены периодический надзор, вызывная сигнализация.

К началу текущего года в 20 энергосистемах, имеющих 50% всей установленной по Министерству электростанций мощности, центральные диспетчерские пункты были оборудованы средствами телемеханики. Телемеханикой оснащен ряд районов высоковольтных электросетей, а также первые два района городских кабельных сетей. Телеуправление было выполнено на 44 гидростанциях, составляющих 65% общей мощности гэс Министерства электростанций. Все это улучшило контроль за работой энергосистем и повысило оперативность диспетчерского управления.

Опыт внедрения автоматизации и телемеханизации в энергосистемах МЭС следует распространить применительно к конкретным условиям на остальную энергетику — промышленную, транспортную, коммунальную, сельскохозяйственную, где автоматика внедряется пока еще очень слабо. Вследствие того, что на промышленных, транспортных, коммунальных и сельскохозяйственных электростанциях и подстанциях общий технический уровень эксплуатации и экономические показатели работы, а также производительность труда, как правило, сильно отстают от уровня, достигнутого энергосистемами МЭС, их автоматизация даст особенно большой эффект.

Опыт работы по автоматизации и телемеханизации в энергосистемах Министерства электростанций выявил и ряд недостатков, которые необходимо быстрее исправлять; нужно исключить возможность их повторения в энергосистемах МЭС, а равно при автоматизации промышленных, транспортных и коммунальных электростанций и сетей. Общей чертой всех недостатков, имевших место при автоматизации и телемеханизации в энергетике, являлась в той или иной степени недооценка эффективности затрат и их окупаемости, т. е. недооценка технико-экономической стороны проводившихся работ по автоматизации и телемеханизации.

На тепловых электростанциях недостаточно приспособлены к автоматизации отдельные виды основного оборудования котельных и турбинных цехов; имеется неполная механизация, например, в части разгрузки топлива, удаления шлака, обдувки поверхностей нагрева и загрузки реагентов в химических цехах; не автоматизированы некоторые непрерывные процессы и периодические операции.

На гидроэлектростанциях, например, весьма совершенные схемы автоматического управления выполняются на аппаратуре гидроавтоматики с конструктивными дефектами и недостаточно тщательно изготовленной. До сих пор выпускаемые предприятиями министерств тяжелого машиностроения, электротехнической промышленности, приборостроения и средств автоматизации реле-датчики (температурные, струйные, давления, оборотов и др.) не обеспечивают надежной работы. Медленно ведутся разработки современных электрогидравлических регуляторов скорости гидротурбин. Имеет место отставание в деле автоматизации гидротехнических сооружений.

Проектными организациями МЭС и энергосистемами допускались перестраховки и излишества в области релейной защиты сетей, особенно в области телемеханизации; сплошь и рядом не учитывалось, насколько действительно нужны для повседневной работы и как часто используются многочисленные телесигналы, телеизмерения и операции телеуправления.

Всесторонняя критика отдельных ошибок, допущенных в начальный период, поможет улучшению дела автоматизации и телемеханизации энергетики не только в системе Министерства электростанций, но и в других министерствах и ведомствах, имеющих различные энергетические установки.

Нельзя удовлетворяться, как это бывало еще недавно, автоматизацией отдельных процессов и агрегатов, искусственным приспособлением автоматики к наличному, но не всегда подходящему оборудованию, а также решением вопросов главным образом в плане только техническом. Более глубокий подход к автоматизации в энергетике должен иметь своей основой наряду с техническими преимуществами выигрыш в экономическом направлении, в первую очередь в части снижения трудовых затрат.

В проектах нового энергетического оборудования теперь с самого начала принимаются условия его работы с автоматическим управлением. Для эффективности автоматизации большое значение имеет увеличение единичных мощностей

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

агрегатов, упрощение компоновок и коммуникаций в тепловой части и схем первичной коммутации в электрической, в частности переход на блочные схемы. При условии дополнительной установки ряда новых видов авторегуляторов непрерывных процессов, механизации некоторых из них, а также внедрения автоматов технологической защиты и периодических операций, сочетаемых в рациональном объеме с централизацией контроля и управления, значительно сможет быть снижена пока все еще довольно высокая удельная численность персонала на тепловых электростанциях.

Решение ряда новых и специфических вопросов требуется в части автоматизации строящихся и проектируемых атомных электростанций.

На гидроэлектростанциях необходимо более широко внедрять групповое и автооператорное управление активной и реактивной мощностью, автоматизировать гидротехнические сооружения, что дополнительно облегчит и повысит оперативность управления.

В электросетях предметом особого внимания должны оставаться вопросы упрощения первичных схем, упрощения релейной защиты и внедрения переменного оперативного тока; это — ключевые условия для ускорения и удешевления сооружения подстанций и облегчения их эксплуатации.

Самое же важное направление работ в данное время вытекает из указанных выше задач автоматизации управления режимами энергосистем.

На соответствующие исследовательские и экспериментальные работы, проводимые применительно к единой энергосистеме Европейской части СССР, должно быть обращено самое большое внимание. Эти работы должны быть всемерно ускорены, так как соединение Куйбышевской гэс, а следовательно, Центрального энергообъединения через район Бугульмы с Уралом намечено осуществить уже в 1958 г.

В СССР ведутся исследования, разработки и частично опыты по нескольким различным методам автоматического регулирования частоты и экономического распределения активной мощности в крупных энергосистемах с учетом потерь в сетях, а также ограничений, налагаемых слабыми связями (межсистемные линии с пропускной способностью, составляющей относительно небольшую долю мощности соединяемых энергосистем). В этих разработках приняты разная степень автоматичности действия, разный объем использования телеканалов, разное размещение задающих и решающих элементов между станциями и диспетчерскими пунктами. Соответственно различно вводятся исходные данные — автоматически при помощи телеизмерений на диспетчерских пунктах и путем переключений и корректирования на станциях, сменными графиками — шаблонами, выполненными на основе предварительных вариантных расчетов, при помощи ручных установочных приспособлений и т. д. Эти разработки и исследования, особенно их опытная проверка, позволят на основе сравнимых критериев выявить преимущества и недостатки каждого метода, правильно оценить сопоставимые затраты, надежность и, самое главное, реальный экономический эффект от применения каждого из способов автоматического регулирования частоты и распределения активной мощности в объединенных энергосистемах, снижения потерь и лучшего использования гидроресурсов при определенных достижимых точностях работы.

Другой важной проблемой являются автоматическое регулирование напряжения и экономичность распределения реактивных мощностей в крупных объединенных энергосистемах. Ей до сих пор не уделялось должного внимания. А между тем очевидно, что задача поддержания уровня напряжения в контрольных точках и распределения реактивных нагрузок с учетом экономичности и, в частности, потерь в сетях, конечно, тоже должна решаться средствами автоматики.

Следует также отметить, что и на автоматическое регулирование напряжения в сетях и на шинах потребительских электроустановок до сих пор почти не обращалось внимания. В результате имеется серьезное отставание в использовании возможностей автоматизации регулирования напряжения под нагрузкой, в трансформаторах, автоматизации управления батареями статических конденсаторов и т. п. Реализация же этих возможностей положительно сказалась бы на уменьшении пределов колебания напряжения, на улучшении работы промышленных, коммунальных и бытовых электроустановок и на снижении потерь в распределительных сетях.

Большого внимания требуют вопросы автоматизации предупреждения и ликвидации аварийных режимов в крупных объединенных энергосистемах, в том числе в создаваемой единой энергосистеме Европейской части СССР. Практика последних лет кардинально изменила некоторые взгляды на вопросы устойчивости параллельной работы электростанций и энергосистем. Устойчивость неизмеримо повысилась в результате главным образом внедрения форсировки возбуждения и быстродействующей защиты. Если раньше возникновение асинхронного хода считалось одним из наиболее тяжелых аварийных режимов и заканчивалось разделением энергосистемы, то теперь во многих энергосистемах при определенных условиях выполняется и успешно работает несинхронное АПВ, действием которого после аварийного разделения производится включение без проверки синхронизма, и возникающий при этом асинхронный ход, как правило, быстро заканчивается втягиванием в синхронизм.

Возможности применения различных устройств автоматики для предупреждения и быстрой ликвидации нарушений режима и аварий без непосредственного вмешательства персонала исключительно велики, и в настоящее время еще трудно полностью их оценить применительно к сверхмощным объединениям, которые будут образованы в недалеком будущем.

Автоматические регуляторы возбуждения генераторов и синхронных компенсаторов с воздействием не только по отклонению контролируемых величин, но и по их производным (так называемые регуляторы сильного действия) не только

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

повышают устойчивость работы через протяженные линии, позволяя работать с углами, близкими к критическим, а в аварийных условиях и превышающими критические. Как показали исследования, применение этого регулирования позволяет повысить пропускную способность дальних электропередач, т. е. снизить затраты на их сооружение и на выполнение других дорогостоящих средств, например установок продольной компенсации.

При нарушениях устойчивости в случае протяженных и сильно загруженных линий вполне возможно не только автоматически выявить начавшийся асинхронный ход, но и автоматически создать условия, облегчающие его прекращение.

Это — временная автоматическая разгрузка отстающих энергосистем с возникшим в результате нарушения синхронизма дефицитом мощности. Это — автоматическое торможение опережающих станций или энергосистем, где в результате нарушения синхронизма появился избыток мощности (отключение части агрегатов, временное электрическое или механическое торможение агрегатов).

Рассматривавшаяся выше автоматика общесистемного назначения в конечном счете реализует свое действие на электростанциях при помощи установленных местных автоматических устройств. Таким образом, создается сложный и единый автоматический комплекс для ведения связанного и непрерывного производственного процесса, территориально разделенного на сотни и тысячи километров.

Правильные и наиболее целесообразные в техническом и экономическом отношениях решения должны быть найдены в итоге большой работы, ведущейся широким фронтом и во всех возможных направлениях. Одновременно следует вести исследования как в области создания специальных непрерывно действующих управляющих машин с автоматическим вводом в них всех или части исходных данных и с элементами логического действия, так и в области приспособления имеющейся станционной автоматики к целям общесистемного регулирования. Не должны оставаться вне поля зрения и давно применяемые первичные регуляторы — регуляторы скорости гидравлических, а особенно паровых турбин с их более быстродействующими регулирующими органами; некоторые из них могут быть усовершенствованы и использованы, например, для распредения нагрузок между агрегатами, для повышения устойчивости, ресинхронизации агрегатов и т. д.

До настоящего времени в энергосистемах получили распространение главным образом системы автоматического регулирования, действующие по принципу ликвидации возникшего рассогласования между соответствующим параметром и заданием. Такие системы дают только однозначное решение, в той мере близкое к оптимальному, в какой это предусматривается соответствующим заданием. Между тем в регулировании некоторых связанных сложных процессов в ряде случаев оптимальное решение не может быть заданным, его надо искать, выбирать из ряда возможных; в таких случаях необходимо применять самонастраивающиеся автоматические системы. Исследования в области самонастраивающихся автоматических систем в энергетике следует вести, например, применительно к задачам регулирования распределения активных и реактивных мощностей с учетом всех многочисленных условий, определяющих фактор экономичности; регулирования к. п. д. блоков котел—турбина—генератор; регулирования мощности гидроэлектростанций с учетом напора, изменения числа работающих агрегатов, угла поворота лопастей (для поворотно-лопастных турбин) и др.

В связи с разработкой управляющих машин требуются новые решения и в области телемеханики, например, разработка систем дискретной, цифровой передачи телеизмерений для автоматического ввода данных и для передачи команд. Одновременно должны решаться задачи использования новых элементов и направлений в выполнении самих автоматических устройств — применение полупроводников, магнитных элементов, новейших принципов моделирования и счетно-вычислительной техники, радиоактивных изотопов в теплотехническом контроле и пр. В деле совершенствования самих средств контроля, автоматизации и телемеханизации энергосистем должны быть использованы все новые возможности и открытия современной науки и техники.

Наряду с разработками в этой области, ведущимися исследовательскими и проектными организациями Министерства электростанций, многое могут дать институты Академии наук СССР, научные и экспериментальные лаборатории высших энергетических учебных заведений. В связи с этим еще раз нужно подчеркнуть важность укрепления связи перечисленных организаций между собой с целью приближения тематики исследовательских и теоретических работ в области автоматизации и телемеханизации в энергетике к действительным запросам быстро развивающихся энергетических объединений Советского Союза.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

О перспективах дуговых вентилей и о механических выпрямителях[1]

Кандидат техн. наук Н. С. КЛИМОВ
Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина

В статье Э. Маркса «Механические выпрямители с роликовыми контактами» (ETZ, № 8, 1954) описаны интересные работы, проводимые Э. Марксом и его сотрудниками по созданию механического выпрямителя, способного работать как при высоких, так и при низких напряжениях. Одновременно с этим Э. Маркс дает сравнительную оценку дуговому вентилю высокого давления. Основные положения статьи сводятся к следующему. Дуговой вентиль высокого давления пригоден только для работы при высоких напряжениях, но и в этом случае ему свойственен ряд существенных недостатков: 1) высокое падение напряжения в дуге; 2) значительный расход воздуха, что требует компрессорных установок большой мощности; 3) значительное обгорание электродов. Выпрямитель же с роликовыми контактами свободен от этих недостатков.

В статье рассматриваются две конструкции выпрямителей с роликовыми контактами. В одной ролики катятся один по внешней поверхности другого, состоящего из отдельных сегментов. Во второй конструкции два ролика, электрически соединенных между собой, располагаются внутри сегментов и катятся по ним. Эти ролики укрепляются на рычагах и прижимаются к сегментам за счет центробежной силы (без пружин). Коммутация тока при низком напряжении осуществляется при помощи насыщающихся дросселей. При высоком напряжении при коммутации тока допускается возникновение дуги на контактах с длительностью горения примерно 30° эл. Дуга гасится при прохождении тока через нуль при помощи воздушного дутья, которое подается только на время коммутации тока. Описываются результаты, полученные на экспериментальном однофазном выпрямителе с роликовыми контактами, который длительно и надежно работал при токе 1 000 *а* и обратном напряжении 20 *кв*. Намечаются пути дальнейших работ. Предполагается разработка многофазных выпрямителей.

Мы не собираемся возражать против оценки, данной Э. Марксом дуговому вентилю высокого давления в том виде, в каком он был им предложен. Однако известно дальнейшее развитие дугового вентиля, которое открывает возможности устранения большинства трудностей на пути к созданию вентиля высокого давления. Сюда относится наше изобретение «Многоанодный дуговой вентиль» (высоковольтное коммутационное устройство), которое описано в авторском свидетельстве № 54753, заявленном 4 февраля 1938 г. и опубликованном 30 апреля 1939 г.

В своей статье Э. Маркс высказывает удовлетворение тем обстоятельством, что в высоковольтном выпрямителе с роликовыми контактами дуга горит только 30° эл. В многофазном дуговом вентиле по рис. 1 дуга на электродах будет также гореть 30° эл. или даже меньше в зависимости от числа фаз обмотки. Сущность нашего изобретения заключается в следующем.

Применяется многофазная замкнутая обмотка, размещаемая на сердечниках трансформаторов. Не останавливаясь детально на вопросе создания многофазного трансформаторного агрегата, ограничимся только тем указанием, что в одной из перспективных 12-фазной схеме трансформаторный агрегат может быть скомпонован из трансформаторов нормальной конструкции, из двух трехфазных либо из шести однофазных[2]. К каждому выводу многофазной обмотки присоединяются два коммутационных элемента — один, присоединяющий вывод от обмотки, к положительному токосбору, другой — к отрицательному токосбору. В свою очередь, коммутационный элемент состоит из двух неподвижных сегментной формы электродов и двух подвижных. Подвижные электроды электрически соединены между собой; один из неподвижных присоединяется к многофазной обмотке, а другой—к токосбору. Все коммутационные элементы каждого токосбора (полюса) укрепляются на отдельных валах и вращаются синхронными двигателями.

Все вращающиеся в пространстве электроды располагаются со сдвигом друг относительно друга для обеспечения разновременности присоединения выводов от обмотки к токосборам. Коммутация тока должна происходить таким образом, чтобы вывод от одной фазы обмотки не отключался до тех пор, пока не подключится другой. Вращающиеся электроды (сегменты) не скользят

[1] Печатается в порядке обсуждения.

[2] Трансформаторы должны иметь две идентичные вторичные обмотки

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

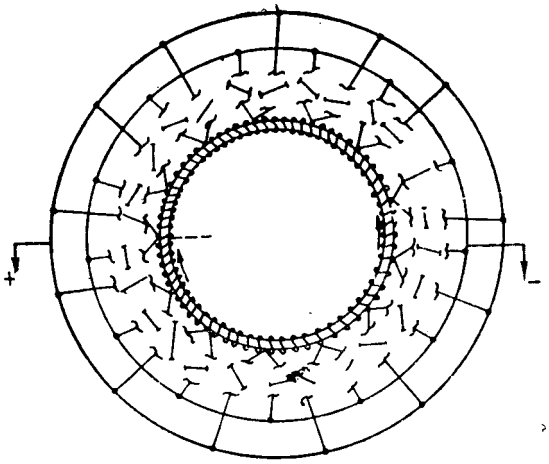


Рис. 1.

по неподвижным электродам (сегментам), а проходят мимо них с некоторым воздушным зазором так, что ток протекает через дугу. Зазор между подвижными и неподвижными электродами выполняется по возможности малым.

Коммутационные элементы могут выполняться самостоятельными или так, что все принадлежащие к одному токосбору элементы размещаются в одном корпусе.

В настоящей статье мы не останавливаемся на решении конструктивных вопросов, в частности на конструктивном выполнении охлаждения подвижных электродов, укажем только, что все они нашли удовлетворительное разрешение.

Коммутационные элементы должны работать или при повышенном по отношению к атмосферному давлении воздуха, или при атмосферном давлении. При больших расстояниях между электродами (что имеет место в многофазном дуговом вентиле) может оказаться, что высокого давления и не потребуется. Для гашения дуги при прохождении тока через нуль применяется воздушное дутье. При помощи распределителя (как это указано в авторском свидетельстве № 54967) воздушное дутье подается только к тем коммутационным элементам, в которых в данный момент происходит коммутация тока. Коммутация тока в фазах обмотки происходит при угле регулирования, не равном нулю. В этот момент э. д. с. в них противодействует току в том коммутационном элементе, ток в котором должен прекратиться.

О перспективности многофазных схем с замкнутой обмоткой нами указывалось ранее в ряде работ [Л. 3 ... 5].

Основные соотношения для многофазных схем выражаются следующими формулами [Л. 3].

Среднее значение выпрямленного напряжения преобразователя, не учитывая внутреннего падения напряжения в воздушных промежутках, для m-фазной схемы будет:

$$U_d = \frac{U_2 \sqrt{2} m}{\pi}.$$

В выпрямительном режиме

$$\cos(\gamma + \alpha) = \cos\alpha - \frac{I_d x}{U_d \sin\frac{\pi}{m}},$$

где γ — угол перекрытия;
α — угол регулирования.

В инверторном режиме

$$\cos(\beta - \gamma) = \cos\beta + \frac{I_d x}{U_d \sin\frac{\pi}{m}},$$

где β — угол опережения зажигания.

Действующее значение тока во вторичной обмотке многофазного трансформатора

$$I_2 = \frac{I_d}{2} k,$$

где k — коэффициент, который определяется из кривой тока.

При трапецоидальной форме тока и угле перекрытия 20° эл. $k = 0{,}92$.

Расчетная мощность многофазного трансформатора $P_m = 1{,}02\ P'_d$.

За счет э. д. с. фазы при подходе подвижных электродов под неподвижные воздушный промежуток пробивается. Этот промежуток небольшой — меньше 2 *мм*, и при том давлении воздуха в 2,5 *ат*, которое применяется в дуговых вентилях высокого давления, промежуток будет с допустимым разбросом пробиваться. После зажигания дуги в следующем коммутационном элементе данного токосбора начинается коммутация тока в фазе. Ток в коммутационном элементе, который должен прекратить работу, пройдет через нуль, поданное к этому времени воздушное дутье обеспечит гашение дуги.

Многофазный дуговой выпрямитель выгодно отличается от других схем тем, что в нем в момент гашения дуги к промежутку, состоящему из двух зазоров, прикладывается напряжение одной фазы, которое в несколько раз меньше выпрямленного напряжения. В этой схеме получаем совершенно новое качество. В мостовой схеме А. Н. Ларионова, которая только и применяется при высоких напряжениях, к промежутку после гашения дуги прикладывается напряжение, равное от 50 до 100% выпрямленного напряжения.

После окончания коммутации тока напряжение начинает расти, но с еще большей скоростью растет воздушный промежуток в двух зазорах. Зная угол перекрытия, легко определить время горения дуги в каждом коммутационном элементе. При 12-фазной схеме это время будет составлять 30 ... 40° эл., при 24-фазной схеме 20 ... 30° эл. Описываемый преобразователь может работать как в выпрямительном, так и в инверторном режимах.

Сопоставим основные свойства многофазного дугового вентиля с дуговым вентилем высокого давления.

Падение напряжения в дуге. В многофазном дуговом вентиле как максимальное, так и среднее значение падения напряжения в несколько раз меньше. Воздушный промежуток двух зазоров в многофазном дуговом вентиле составляет менее 2 *мм*, тогда как в дуговом вентиле имеется от четырех до шести промежутков по 26 *мм*, что, естественно, приводит к резкому увеличению падения напряжения в дуге. Кроме

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

того, вследствие малой продолжительности горения дуги среднее падение напряжения в многофазном дуговом вентиле во много раз меньше. При коммутации тока дуга в многофазном вентиле специально несколько растягивается, но незначительно, так как к промежутку после прохождения тока через нуль прикладывается только напряжение одной фазы, которое, как уже указывалось, в несколько раз меньше выпрямленного напряжения.

Мощность компрессорной установки. В этом отношении многофазный дуговой вентиль также выгодно отличается от вентиля высокого давления. Во-первых, в многофазном дуговом вентиле дутье подается только в моменты коммутации тока; во-вторых, в многофазном вентиле дуга обрывается при переходе тока через нуль при напряжении, в несколько раз меньшем; в-третьих, объем ионизованного воздуха во много раз меньше; в-четвертых, в отличие от дугового вентиля высокого давления нет необходимости в больших скоростях воздуха для обеспечения четкого зажигания, так как в нашем случае при малых зазорах зажигание можно получить, не прибегая к этому. Для зажигания дуги не требуется сложных дополнительных устройств.

Электроды. Обгорание электродов в многофазном дуговом вентиле во много раз меньшее. Во-первых, дуга в коммутационном элементе горит значительно меньшее время (в 4—6 раз). Следовательно, потери, выделяемые на электродах, будут во столько же раз меньше. Во-вторых, при подвижных электродах катодное пятно и весь столб дуги перемещаются с большей скоростью и в этих условиях при одних и тех же габаритах работает значительно бóльшая поверхность.

Вентильная прочность. Вентильная прочность многофазного дугового вентиля значительно выше, так как процесс деионизации происходит при напряжении, в несколько раз меньшем, а по мере нарастания обратного напряжения промежуток увеличивается со скоростью, в 2 раза большей. К тому же промежуток, к которому прикладывается максимальное обратное напряжение, значительно больше и значительная часть его вообще не подвергается ионизации.

Наряду с существенными преимуществами многофазный дуговой вентиль имеет и недостатки, к которым относятся: 1) потребность большого числа трансформаторов; 2) наличие подвижных частей; 3) более инерционное управление.

В многофазном дуговом вентиле управление производится путем поворота ротора синхронного двигателя, что осуществляется путем изменения тока в дополнительной обмотке ротора. Создаваемое обмоткой поле сдвинуто на угол 90° к главному полю ротора. При изменении тока в дополнительной обмотке изменяется и фаза суммарного потока ротора, а следовательно, и положение ротора в пространстве. При регулировании напряжения в нормальных режимах в многофазном дуговом вентиле все обстоит благополучно. При аварийных же режимах ротор имеет бóльшую инерцию, чем системы управления в вентилях другого типа. Но учитывая, что после протекания больших токов при аварийных режимах вентили нельзя сразу включить и автоматическое повторное включение производят не ранее чем через 0,5 *сек*, можно не придавать большого значения этому недостатку, так как за время 0,5 *сек* в многофазном дуговом вентиле тоже можно осуществлять управление. Многофазный дуговой вентиль позволяет совсем снимать напряжение. В этом случае он будет работать как выключатель постоянного тока. Схема управления предельно проста, так как она не содержит тех сотен аппаратов, которых требуют другие системы.

В дополнение укажем, что при малых мощностях выпрямителей и периодической их работе не потребуется организациии специального дутья, так как дутья, возникающего при вращении подвижных частей, достаточно для деионизации промежутков.

При описании выпрямителя с роликовыми контактами Э. Маркс указывает, что этим вопросом уже занимались как в Германии, так и за рубежом, но прежние предложения якобы давали технически неприемлемые устройства. В нашем авторском свидетельстве № 54967, заявленном 5 января 1938 г. и опубликованном 31 мая 1939 г., изложены все основные принципы и конструктивные решения, которые подвергались дальнейшей разработке Э. Марксом и его сотрудниками.

Поясним также, что в формуле предмета изобретения в § 3 указано, что контактные ролики неподвижны. Это следует понимать в том смысле, что их оси неподвижны, а сами ролики вращаются.

В описании авторского свидетельства указывается, что схема многофазного преобразователя в общем случае это по существу схема машины постоянного тока, обмотка которой размещается на сердечниках нормальных трансформаторов. В многофазном преобразователе с замкнутой обмоткой применяется то же число фаз, что и в схемах ионных преобразователей (6—24). Известные же полигонные схемы имеют нулевую точку.

В преобразователе к промежуткам после окончания коммутации тока прикладывается напряжение, не превосходящее максимального фазового напряжения, которое в зависимости от числа фаз в 2—8 раз меньше выпрямленного напряжения.

Произведем сравнение выпрямителя с роликовыми контактами, описанного в статье проф. Э. Маркса, с выпрямителем того же типа, описанного в нашем авторском свидетельстве № 54967.

1. Применение роликовых контактов и аргументация в их защиту совпадают в статье и авторском свидетельстве.

2. Конструкция выпрямителя с роликами, вращающимися внутри неподвижных сегментов, совпадает.

В сноске 6 на стр. 268 статьи Э. Маркса говорится: «В практическом выполнении оси внутренних роликовых электродов не связаны неподвиж-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

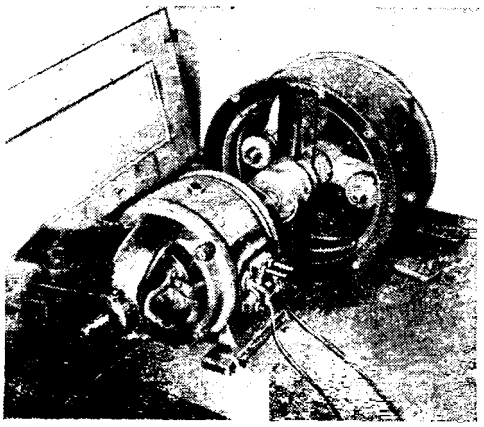


Рис. 2.

но с циркулирующей шайбой, но насажены на плечи рычагов, имеющих на противоположном конце противовес. Этими противовесами можно регулировать нажатие в контакте, которое создается центробежной силой при вращении. Эта контактная сила важна как для прохождения тока, так и для прочности колец». В описании названного свидетельства № 54967 более подробно описана точно такая же конструкция.

3. Идея выполнения конструкции, в которой один ролик катится по внешней поверхности другого, полностью совпадает. В авторском свидетельстве № 54967 написано: «Можно поменять местами ролик и сегмент, т. е. ролики будут неподвижны, причем ролики будут укреплены на пружинах; это упрощает вращающие части, так как вращающимся будет только диск с сегментами, которые вращать гораздо легче, чем ролик. Что является более целесообразным может показать опыт.

В случае, если окажется, что при вращении ролика будет иметь место удар последнего о сегмент, можно вместо двух отдельных сегментов применить сплошное кольцо из изоляционного материала с укрепленными в двух местах двумя сегментными ламелями, расположенными заподлицо с изоляцией; в такой конструкции контактные ролики все время будут катиться по кромке кольца; немного разный износ меди и изоляции на работу не повлияет, так как ролик будет укреплен на пружине и будет катиться, чего нельзя допустить на коллекторе, на котором имеет место скольжение».

4. Выполнение изоляции между сегментами совпадает. В обоих описаниях указывается, что изоляция может быть твердая или воздушная. Кроме того, в статье Э. Маркса говорится о смешанной изоляции, которая нами была предложена в те же годы (1939) в авторском свидетельстве № 58800.

5. В обоих случаях применяются отдельные контактные элементы для каждой фазы.

6. С целью гашения дуги в обоих случаях применяется воздушное дутье.

7. В обоих схемах дутье при помощи специального распределителя подается только в моменты коммутации тока.

Из статьи Э. Маркса следует, что намечается переход к применению многофазных схем, которые (при замкнутой обмотке) нами применяются как основные и о преимуществах которых нами указывалось выше.

Все сказанное ни в какой степени не умаляет тех дальнейших успешных творческих разработок этого направления, которые выполнены и продолжают развиваться Э. Марксом и его сотрудниками.

В заключение приводим фотоснимок (рис. 2) разработанного нами однофазного выпрямителя с внутренними роликовыми контактами. В свое время были проведены его испытания при низком напряжении. На рис. 3 дана осциллограмма тока. Некоторые колебания тока объясняются тем, что выпрямитель питался от источника низкого напряжения 8 *в* и небольшие изменения в переходном контакте влияли на величину напряжения.

Устройство нами было разработано и изготовлено только для проверки работы самого роликового контакта, и созданием этого устройства не преследовались решения других вопросов, в частности вопроса токосъема с вращающихся роликов. В выполненной конструкции применены подшипники с графитовой смазкой, которые позволяют производить съем относительно небольших токов, что возможно ввиду малой окружной скорости на оси.

Для больших токов при конструкции коммутационного элемента с роликами, располагающимися внутри сегментов, мы предлагали использовать тот же принцип, что и описанный Э. Марксом, а именно замыкание двух сегментов двумя роликами, укрепленными на одной несущей конструкции и электрически соединенными между собой.

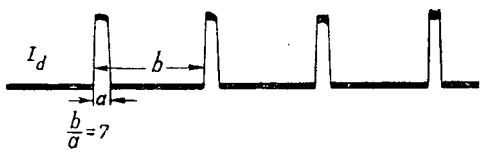


Рис. 3.

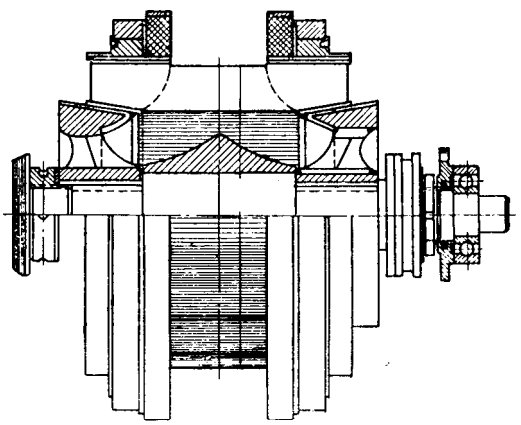


Рис. 4.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Идея такого контакта нами описана в те же годы в авторском свидетельстве № 74403, в котором предусматривается, что при применении контактов с возвратно-поступательным движением два неподвижных контакта замыкаются двумя подвижными контактами, укрепленными на одной несущей конструкции и электрически соединенными между собой.

На рис. 4 представлен разрез контактного элемента с комбинированной (частично твердой, частично газообразной) изоляцией, который предназначается как для преобразователей со скользящими контактами (щетками), так и для преобразователей с катящимися контактами (роликовыми). Комбинированная изоляция совмещается с естественным воздушным дутьем, возникающим в результате вращения (медные пластины при этом выполняют роль лопаток центробежного вентилятора); с этой целью в удерживающих торцовых шайбах выполняются отверстия. По краям между медными пластинами закладывается миканитовая изоляция, причем на поверхности и внутри контактного элемента она должна выходить на 2 ... 3 *мм* за край пластины. Все остальное пространство между пластинами ничем не заполняется. В этом промежутке и устанавливаются щетки или ролики. Для более интенсивного обдува межпластинной изоляции она выполняется по кривой лемнискате. При высоком напряжении в качестве изоляции медных пластин от корпуса может быть применен или толстый слой миканита, или же удерживающие шайбы могут быть выполнены целиком из изоляционного материала стеатита, микалекса и др. Дутье удаляет пыль и грязь из пространства между пластинами, производит деионизацию этих промежутков и всего пространства, окружающего контактный элемент, а также производит интенсивное охлаждение работающих поверхностей. Интенсивное охлаждение места токосъема позволяет

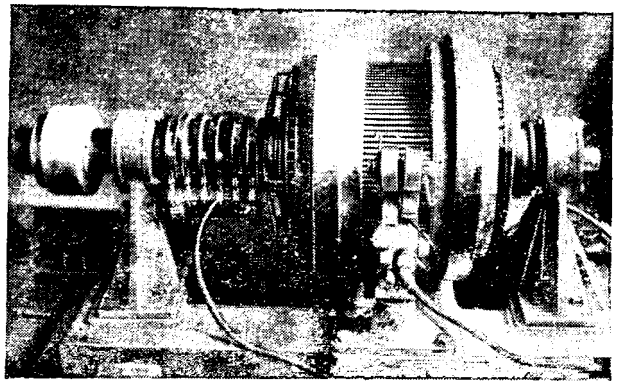


Рис. 5.

значительно повысить плотность тока. Такой контактный элемент проходил длительные испытания, при которых надежно выдерживал прикладываемое между пластинами напряжение 1 000 *в* при плотностях тока, значительно превосходящих те, которые можно было бы получить без постоянно действующего дутья. При диаметре вращающейся части 250 *мм* и скорости вращения 1 500 *об/мин* скорость воздуха составляет 6 *м/сек*.

На рис. 5 представлен фотоснимок контактного элемента.

Литература

1. Э. Маркс. ETZ, № 8, 1954.

2. В. А. Толвинский. Трансвертер. Электричество, № 10, 1924.

3. Н. С. Климов. Преобразователь постоянного тока. Бюллетень ВЭИ, № 6, 1941.

4. Н. С. Климов. Авторское свидетельство № 54753, 1939.

5. Н. С. Климов. Авторское свидетельство № 54967, 1939.

6. Н. С. Климов. Авторское свидетельство № 58800. Приоритет 13/VII 1939 г., опубликовано в 1941 г.

7. Н. С. Климов. Авторское свидетельство № 74403. Приоритет 21/I 1940 г., опубликовано в 1949 г.

[5.10.1955]

✧ ✧ ✧

Расчет гармоник выпрямленного тока и напряжения

Кандидат техн. наук А. М. ПИНЦОВ

Ленинград

Введение. В литературе известно много работ, посвященных теоретическому анализу электромагнитных процессов в схемах с вентильными приборами. Почти все исследования базируются на методах кусочно-линейной аппроксимации характеристики вентиля. С достаточной для практики точностью обычно ограничиваются рассмотрением случаев идеально сглаженного постоянного тока или идеально сглаженного постоянного напряжения.

Для точного расчета гармоник выпрямленного тока и напряжения необходимо учитывать распределение параметров в различных звеньях схемы преобразования, в том числе и на стороне постоянного тока. В результате составления и решения уравнений схемы преобразования получают формулы для выпрямленного тока, из которых разложением в гармонический ряд непосредственно определяют гармоники тока [Л. 1 и 2]. Такой метод является весьма громоздким, а потому практически может быть применен только в случаях наиболее простых цепей выпрямленного тока; при всяких изменениях параметров схемы он требует проведения повторных весьма длительных вычислений.

М. П. Костенко и Л. Р. Нейман [Л. 3] показали, что обычно применяемый метод расчета пульсаций выпрямленного тока в предположении независимости формы кривой выпрямленного напряжения от параметров цепей выпрямленного и переменного токов является неправильным. Необходимость разнообразных и частых исследований

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

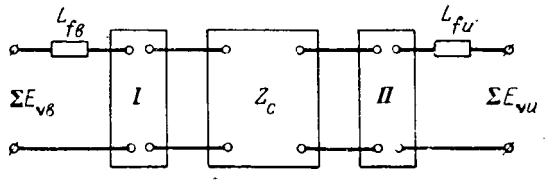


Рис. 1. Эквивалентная расчетная схема системы передачи.

гармоник тока и напряжения в сложных схемах, в частности в мощных системах передачи постоянным током высокого напряжения, а также в тяговых установках, заставила искать новые, более удобные и вместе с тем достаточно точные методы расчета гармоник выпрямленного тока.

В настоящей статье, которая является результатом работ, выполненных автором в Научно-исследовательском институте постоянного тока, исследование гармоник тока и напряжения основано на идее рассмотрения выпрямителя и инвертора как генераторов гармоник в отношении цепи постоянного тока.

Гармоники э. д. с. такого генератора находятся из условия работы его в «режиме холостого хода», иначе говоря из условия, что на стороне постоянного тока схемы преобразования включена бесконечно большая индуктивность. При этом на стороне постоянного тока гармоники тока равны нулю. Особенностью такого генератора гармоник является то обстоятельство, что гармоники его э. д. с. зависят от режима работы преобразовательной установки, т. е. генератор есть продукт истинных условий коммутации. Поэтому гармоники э. д. с. являются функцией э. д. с. системы переменного тока и ее параметров, а также углов зажигания и коммутации.

Гармоники выпрямленного тока зависят от параметров схемы преобразования как на стороне постоянного, так и на стороне переменного тока и могут быть получены как частное от деления гармоник э. д. с. на полное сопротивление цепи преобразования для соответствующей частоты. Такое сопротивление можно представить состоящим из сопротивления цепи постоянного тока и некоторого эквивалентного (усредненного) сопротивления системы переменного тока. Последнему соответствует некоторая эквивалентная

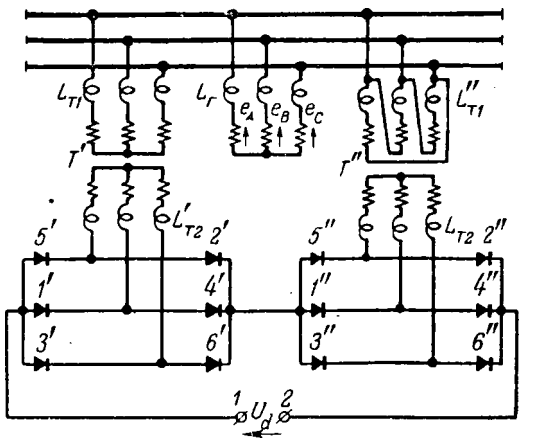


Рис. 2. Каскадное соединение двух трехфазных мостовых схем.

(усредненная) индуктивность системы переменного тока, которая не зависит от частоты. Эквивалентная индуктивность системы переменного тока зависит от режима работы преобразователя и может быть определена, вообще говоря, различными способами.

В статье определяются гармоники э. д. с. и эквивалентные индуктивности способом, оправдавшим себя на практике.

Расчет гармоник тока и напряжения в линии передачи постоянного тока, если уже найдены гармоники э. д. с. и эквивалентные индуктивности преобразователя, легко выполняется по эквивалентной схеме рис. 1. Гармоники тока и напряжения в линии передачи находятся по принципу наложения, а именно — отдельно от выпрямителя и отдельно от инвертора.

В настоящее время наиболее подходящей схемой для дальних передач энергии постоянным током высокого напряжения и для тяговых подстанций электрифицированных железных дорог является каскадное соединение двух трехфазных мостовых схем (рис. 2). Нами рассматривается именно такая схема преобразователя. В приложении приведены формулы для трехфазной мостовой схемы и для схемы «две обратные звезды с разделяющей катушкой».

Гармоники э. д. с. в каскадном соединении двух трехфазных мостовых схем. Здесь будут рассмотрены нормальные режимы работы преобразовательной схемы, а именно режимы поочередного горения четырех и пяти вентилей, одновременного горения пяти вентилей и поочередного горения пяти и шести вентилей [Л. 4]. На рис. 2 номера вентилей соответствуют очередности их зажигания.

Мгновенные значения э. д. с.:

$$e_A = E_m \cos(\vartheta + \alpha);$$

$$e_B = E_m \cos\left(\vartheta + \alpha - \frac{2\pi}{3}\right);$$

$$e_C = E_m \cos\left(\vartheta + \alpha + \frac{2\pi}{3}\right),$$

где $\vartheta = \omega t$ — текущая координата времени в угловых мерах;

α — угол зажигания (время отсчитывается от момента зажигания вентиля 3);

$L_г$ — индуктивность сети;

L'_{T1}; L'_{T2}; L''_{T1}; L''_{T2} — индуктивности рассеяния обмоток трансформаторов (рис. 2).

Полагая, что обмотки трансформатора T' (рис. 2) приведены к одинаковому числу витков, имеем:

$$L'_T = L'_{T1} + L'_{T2}.$$

У трансформатора T'' число витков на первичной стороне в $\sqrt{3}$ раз больше, чем у трансформатора T', а на вторичной стороне число витков у обоих трансформаторов одинаково. Поэтому

$$L''_T = \frac{1}{3} L''_{T1} + L''_{T2}.$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

По условиям работы схемы мощность обоих трансформаторов должна быть одинаковой и, следовательно,

$$L_T' = L_T'' = L_T.$$

Можно показать, что при идеально сглаженном выпрямленном токе преобразователя мгновенные значения выпрямленного напряжения [Л.4]:

при горении четырех вентилей ($1'$, $1''$, $2'$, $2''$)

$$u_{d_4} = (1 + \sqrt{3})\, e_A - e_B; \qquad (1)$$

при горении пяти ($1'$, $1''$, $2'$, $2''$, $3'$)

$$u_{d_5} = \frac{\sqrt{3}}{2}(2 + \sqrt{3})\, e_A; \qquad (2)$$

при горении шести ($1'$, $1''$, $2'$, $2''$, $3'$, $3''$)

$$u_{d_6} = \frac{\sqrt{3}(1-S)}{2 - \sqrt{3}S}[(1 + \sqrt{3})\, e_A - e_C], \qquad (3)$$

где

$$S = \frac{L_r}{L_r + L_T}.$$

Гармоники э. д. с. эквивалентного генератора получим разложением в гармонический ряд мгновенных значений выпрямленного напряжения u_{dn} (горение n вентилей) и $u_{d(n+1)}$ (горение $n+1$ вентилей) за период повторяемости. В рассматриваемой схеме период повторяемости равен $\frac{\pi}{6}$. Поэтому в кривой выпрямленного напряжения содержатся гармоники частоты $12k\omega$, где ω — угловая частота сети, питающей преобразовательное устройство, а k — любое целое положительное число. В режиме поочередного горения четырех и пяти вентилей $\left(\gamma < \frac{\pi}{6}\right)$ уравнение (1) справедливо в пределах от $\gamma - \frac{\pi}{6}$ до 0, а уравнение (2) — в пределах от 0 до γ; γ — угол коммутации.

В соответствии со сказанным выше действующее значение гармоник э. д. с в относительных величинах в режиме поочередного горения четырех и пяти вентилей находим из следующего выражения:

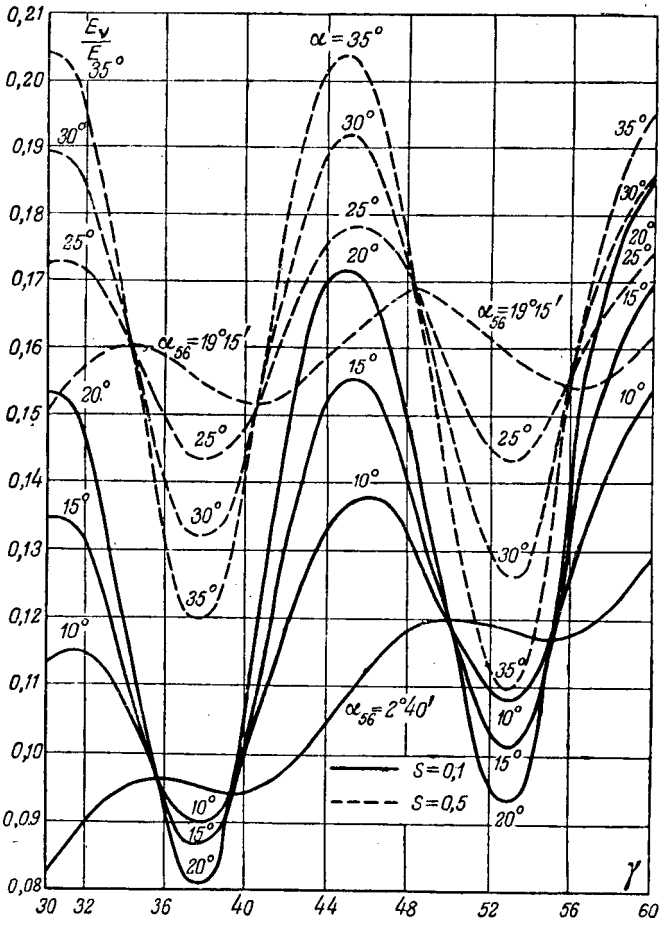


Рис. 3. Гармоники э. д. с. частоты 1 200 *гц* для режима поочередного горения пяти и шести вентилей при различных значениях угла зажигания.

Из (4) следует, что для углов коммутации γ, удовлетворяющих условиям $\cos\frac{12k+1}{2}\gamma = 0$ или $\cos\frac{12k-1}{2}\gamma = 0$, значения $\frac{E_\nu}{E}$ будут при любых α одинаковыми. Следовательно, кривые $\frac{E_\nu}{E} = f(\alpha, \gamma)$, построенные для различных значений α, будут пересекаться при $\frac{12k+1}{2}\gamma_1 = \frac{\pi}{2} + n\pi$ и при $\frac{12k-1}{2}\gamma_2 = \frac{\pi}{2} + n\pi$, где n — целое положительное число. Формула (4) имеет смысл в интервале $0 \leqslant \gamma \leqslant \frac{\pi}{6}$. Формулу для одновременного горения пяти вентилей получим, если в (4) положим $\gamma = \frac{\pi}{6}$.

$$\frac{E_\nu}{E} = \frac{1}{E}\cdot\frac{6}{\pi}\,\mathrm{Mod}\left\{\int_{\gamma-\frac{\pi}{6}}^{0} u_{d4}\varepsilon^{-j12k\vartheta}\,d\vartheta + \int_{0}^{\gamma} u_{d5}\varepsilon^{-j12k\vartheta}\,d\vartheta\right\} =$$

$$= \frac{6\sqrt{3}}{\pi}\sqrt{\frac{\cos^2\frac{12k+1}{2}\gamma}{(12k+1)^2} + \frac{\cos^2\frac{12k-1}{2}\gamma}{(12k-1)^2} - \frac{2}{144k^2-1}\cos\frac{12k+1}{2}\gamma\cos\frac{12k-1}{2}\gamma\cos(2\alpha+\gamma)}. \qquad (4)$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Гармоники э. д. с. в режиме поочередного горения пяти и шести вентилей находим из разложения в гармонический ряд u_{d_5} в интервале от $\gamma-\frac{\pi}{6}$ до $\frac{\pi}{6}$ (горение пяти вентилей) и u_{d_6} в интервале от $\frac{\pi}{6}$ до γ (горение шести вентилей):

$$\frac{E_\nu}{E}=\frac{1}{E}\cdot\frac{6}{\pi}\operatorname{Mod}\left\{\int_{\gamma-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}}u_{d5}\varepsilon^{-j12k\vartheta}d\vartheta+\int_{\frac{\pi}{6}}^{\gamma}u_{d6}\varepsilon^{-j12k\vartheta}\right\}=\frac{6\sqrt{3}}{\pi}\frac{\sqrt{4-6S+3S^2}}{2-\sqrt{3}S}\times$$

$$\times\sqrt{\frac{\cos^2\left(\frac{12k+1}{2}\gamma+\alpha_{56}\right)}{(12k+1)^2}+\frac{\cos^2\left(\frac{12k-1}{2}\gamma-\alpha_{56}\right)}{(12k-1)^2}-\frac{2}{144k^2-1}\cos\left(\frac{12k+1}{2}\gamma+\alpha_{56}\right)\cos\left(\frac{12k-1}{2}\gamma-\alpha_{56}\right)\cos(2\alpha+\gamma)},\qquad(5)$$

где $\alpha_{56}=\operatorname{arctg}\frac{\sqrt{3}S}{4-3S}$ — наименьший угол зажигания, при котором возможен режим поочередного горения пяти и шести вентилей [Л.4].

Формула (5) показывает, что в этом режиме амплитуды гармоник э. д. с. существенно зависят от соотношения индуктивностей сети $L_г$ и трансформаторов L_T. Из (5) следует, что для углов коммутации γ, удовлетворяющих условиям

$$\cos\left(\frac{12k+1}{2}\gamma+\alpha_{56}\right)=0$$

или

$$\cos\left(\frac{12k-1}{2}\gamma-\alpha_{56}\right)=0,$$

значения $\frac{E_\nu}{E}$ будут при любых α одинаковыми. Следовательно, кривые $\frac{E_\nu}{E}=f(\alpha,\gamma)$, построенные для различных значений α и при одном значении параметра S, будут иметь точки пересечения при $\frac{12k+1}{2}\gamma_1+\alpha_{56}=\frac{\pi}{2}+n\pi$ и при $\frac{12k-1}{2}\gamma_2-\alpha_{56}=\frac{\pi}{2}+n\pi$, где n — целое положительное число.

Формула (5) имеет смысл при $\frac{\pi}{6}\leqslant\gamma\leqslant\frac{\pi}{3}$ для значений $S\leqslant\sqrt{\frac{2}{3}}$. Если $S>\sqrt{\frac{2}{3}}$ — наибольшее значение угла коммутации γ, при котором еще возможен режим поочередного горения пяти и шести вентилей, определяется уравнением

$$\operatorname{tg}\gamma=\frac{8-3S^2}{3\sqrt{3S^2}}\ [Л.4].$$

На рис. 3 построено семейство кривых гармоник э. д. с. частоты 1 200 *гц* для режима поочередного горения пяти и шести вентилей при значениях параметров S, равных 0,1 и 0,5.

Очевидно, что в уравнениях (4) и (5) можно ввести вместо угла α угол погасания δ.

Средние эквивалентные индуктивности системы переменного тока. На каждом этапе коммутации горит определенное число вентилей (четыре, пять или шесть), благодаря чему на стороне переменного тока преобразователя токи проходят по различным путям. Зная пути циркуляции токов на каждом этапе коммутации, можно составить вспомогательные схемы путем исключения тех ветвей, в которых отсутствуют токи. Такие схемы при горении четырех, пяти и шести вентилей изображены на рис. 4. В них для удобства дальнейших рассуждений магнитные связи трансформатора T' заменены электрическими. Для каждой такой схемы можно измерить индуктивность со стороны постоянного тока. Метод измерения заключается в приложении синусоидального напряжения U любой частоты к полюсам эквивалентной схемы (зажимы *1—2* на рис. 4). Вместо измерения индуктивностей можно произвести их вычисление. Полученные таким образом индуктивности являются эквивалентными индуктивностями сети переменного тока на соответствующем этапе коммутации.

Для одновременного горения четырех вентилей (например, *1'*, *1''*, *2'* и *2''*) эквивалентную индуктивность системы переменного тока L_4 находим из эквивалентной схемы, изображенной на рис. 4, *а*. Здесь и ниже для краткости обозначено:

$$L''_{T1}=L_1,\ L''_{T2}=L_2.$$

На основании законов Кирхгофа для схемы рис. 4, *а* после некоторых упрощений имеем:

$$\dot{U}=j\omega(2L+2L_2+\sqrt{3}L_г)\dot{I}+\dot{U}_b-\dot{U}_a,$$

$$-\dot{U}_a=j\omega\left(\frac{L_1}{3}+L_г+\frac{L_г}{\sqrt{3}}\right)\dot{I};$$

$$\dot{U}_b=j\omega\left(\frac{L_1}{3}+L_г+\frac{2}{\sqrt{3}}L_г\right)\dot{I},$$

где $\dot{U}_a$ и $\dot{U}_b$ — фазные э. д. с. трансформаторов.

По определению $j\omega L_4=\frac{\dot{U}}{\dot{I}}$ и из этих уравнений находим:

$$L_4=2L(2+\sqrt{3}S),\qquad(6)$$

где

$$L=L_г+L_T.$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

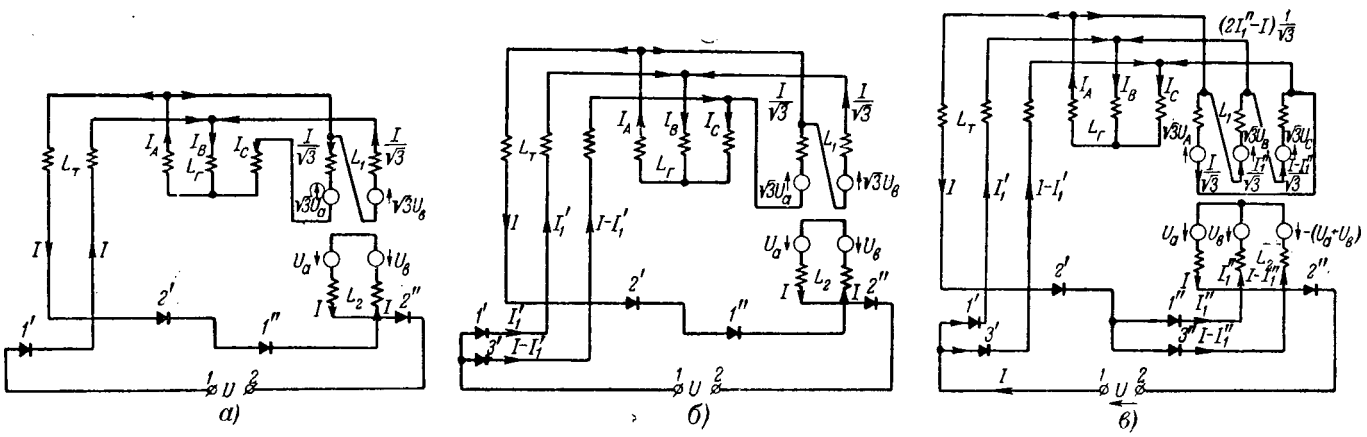


Рис. 4.

а — эквивалентная схема при горении четырех вентилей $\left(I_A = I + \frac{2}{\sqrt{3}} I;\ I_B = I + \frac{I}{\sqrt{3}} I;\ I_C = \frac{I}{\sqrt{3}} I\right)$; *б*—при горении пяти вентилей $\left(I_A = I + \frac{2}{\sqrt{3}} I;\ I_B = I_1' + \frac{I}{\sqrt{3}};\ I_C = I - I_1' + \frac{I}{\sqrt{3}}\right)$; *в* — при горении шести вентилей $\left(I_A = I + \frac{I}{\sqrt{3}} + \frac{I_1''}{\sqrt{3}};\ I_B = I_1' + \frac{2I_1''}{\sqrt{3}} - \frac{I}{\sqrt{3}};\ I_C = I - I_1' + \frac{2I}{\sqrt{3}} - \frac{I_1''}{\sqrt{3}}\right)$.

При одновременном горении пяти вентилей (*1'*, *1''*, *2'*, *2''* и *3'*) получим эквивалентную схему, изображенную на рис. 4, *б*.

Эквивалентную индуктивность системы переменного тока при горении пяти вентилей L_5 находим из следующих уравнений, которые после некоторых упрощений получаем из схемы рис. 4, *б*:

$$I_1' = \frac{1}{2} I;$$

$$\dot{U} = j\omega \left(\frac{3}{2} L + 2L_2 + \sqrt{3} L_r\right) \dot{I} + \dot{U}_b - \dot{U}_a;$$

$$-\dot{U}_a = j\omega \left(\frac{L_1}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2} L_r + L_r\right);$$

$$\dot{U}_b = j\omega \left(\frac{L_1}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2} L_r + L_r\right) \dot{I}.$$

По определению $j\omega L_5 = \frac{\dot{U}}{\dot{I}}$, из этих уравнений находим:

$$L_5 = (3{,}5 + 2\sqrt{3}S)\, L. \qquad (7)$$

При одновременном горении шести вентилей (*1'*, *1''*, *2'*, *2''*, *3'* и *3''*) получим эквивалентную схему, изображенную на рис. 4, *в*.

Эквивалентную индуктивность системы переменного тока при горении шести вентилей L_6 находим из следующих уравнений, которые после некоторых упрощений получаем для схемы рис. 4, *в*:

$$I_1' = \frac{1}{2}(1 + \sqrt{3}S)\, \dot{I} - \frac{\sqrt{3}}{2} S \dot{I}_1'';$$

$$\dot{I}_1'' = \frac{1}{2} \dot{I} - \frac{1}{2} \sqrt{3} S \dot{I}_1';$$

$$\dot{U} = j\omega (L_T + L_r) \dot{I}_1' + j\omega (\sqrt{3} L_r + L_2) \dot{I}_1'' +$$

$$+ j\omega (L_r + L_T + L_2) \dot{I} + \dot{U}_b - \dot{U}_a;$$

$$-\dot{U}_a = j\omega \left(\frac{L_1}{3} + L_r + \frac{2}{\sqrt{3}} L_r\right) \dot{I} - j\omega \frac{L_r}{\sqrt{3}} \dot{I}_1';$$

$$U_b = j\omega \frac{L_r}{\sqrt{3}} \dot{I} + j\omega \frac{L_r}{\sqrt{3}} \dot{I}_1' +$$

$$+ j\omega \left(\frac{L_1}{3} + L_r\right) \dot{I}_1''.$$

По определению $j\omega L_6 = \frac{\dot{U}}{\dot{I}}$ и из этих уравнений имеем:

$$L_6 = 6 \frac{1 - S^2}{2 - \sqrt{3} S} L. \qquad (8)$$

Среднюю эквивалентную индуктивность системы переменного тока в режиме поочередного горения n и $(n+1)$ вентилей приближенно можно определить различными способами. Наиболее простое приближение получается, если принять ее равной средней арифметической от эквивалентных индуктивностей, полученных выше из эквивалентных схем, за период повторяемости.

Идею усреднения индуктивности можно найти также у К. А. Круга [Л.5].

Обозначим через L_{45} среднюю эквивалентную индуктивность системы переменного тока в режиме поочередного горения четырех и пяти вентилей. Так как четыре вентиля горят в интервале времени, определяемом углом $\frac{\pi}{6} - \gamma$, а пять вентилей горят в интервале времени, определяемом углом γ, то средняя эквивалентная индуктивность системы переменного тока будет:

$$L_{45} = \frac{\left(\frac{\pi}{6} - \gamma\right) L_4 + \gamma L_5}{\frac{\pi}{6}}.$$

Подставив значение L_4 из (6) и значение L_5 из (7), получим:

$$L_{45} = \left(4 + 2\sqrt{3}S - \frac{3\gamma}{\pi}\right) L. \qquad (9)$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Формула (9) имеет смысл в интервале $0 \leqslant \gamma \leqslant \frac{\pi}{6}$.

Обозначим через L_{56} среднюю эквивалентную индуктивность системы переменного тока в режиме поочередного горения пяти и шести вентилей.

Тогда аналогично тому, как было определено L_{45} в режиме поочередного горения четырех и пяти вентилей, находим:

$$L_{56} = \frac{\left(\frac{\pi}{3} - \gamma\right) L_5 + \left(\gamma - \frac{\pi}{6}\right) L_6}{\frac{\pi}{6}}.$$

Подставив значения L_5 из (7) и L_6 из (8), получим:

$$L_{56} = \left[3{,}5 + 2\sqrt{3}S - \frac{2 + \sqrt{3}S}{2 - \sqrt{3}S}\left(\frac{3\gamma}{\pi} - \frac{1}{2}\right)\right] L. \quad (10)$$

Формула (10) имеет смысл при $\frac{\pi}{6} \leqslant \gamma \leqslant \frac{\pi}{3}$.

Предложенный приближенный способ расчета гармоник выпрямленного тока и напряжения был сопоставлен с точными вычислениями для трехфазной мостовой схемы при работе выпрямителя на противо-э. д. с. и при полном отсутствии индуктивности в цепи выпрямленного тока для случая, когда приближенный метод дает наибольшие погрешности. Кроме того, была выполнена экспериментальная проверка на модельной установке, состоящей из выпрямителя и инвертора, соединенных между собой цепной схемой из 28 звеньев, содержащих индуктивности, емкости и активные сопротивления.

В том и другом способе проверки имела место хорошая сходимость с результатами приближенного расчета, а именно на максимальных значениях погрешность не свыше 2 ... 3%.

При помощи описанного в настоящей статье метода автор произвел расчет гармоник тока применительно к эксперименту, приведенному в монографии М. П. Костенко, Л. Р. Неймана и Г. И. Блавдзевича [Л. 3]. Полученные результаты были сопоставлены как с опытными данными указанной монографии, так и с результатами расчета без учета эквивалентного сопротивления системы переменного тока, приведенными в этой монографии с целью показать неправильность такого расчета. Это сопоставление подтвердило выводы упомянутых авторов о неприемлемости употреблявшихся до сих пор методов расчета и в то же время показало хорошее совпадение экспериментальных данных с расчетом по методу данной статьи.

Выводы. 1. Полученные формулы для гармоники э. д. с. и средних эквивалентных индуктивностей системы переменного тока позволяют сравнительно быстро и достаточно точно выполнить расчет гармоник тока и напряжения в зависимости от режимов работы выпрямительной и инверторной установок, параметров цепи переменного тока, параметров цепи постоянного тока и сглаживающих устройств.

2. Разработанная методика приближенного расчета справедлива в диапазоне звуковых частот и применима к различным схемам преобразования.

Приложение. В настоящее время в промышленности и на тяговых подстанциях электрифицированных железных дорог широкое применение имеют трехфазные мостовые схемы и схемы „две обратные звезды с разделяющей катушкой".

Для обеих схем гармоники э. д. с. определяются следующим выражением:

$$\frac{E_\nu}{E} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} B \sqrt{\frac{\cos^2 \frac{6k+1}{2}\gamma}{(6k+1)^2} + \frac{\cos^2 \frac{6k-1}{2}\gamma}{(6k-1)^2} - \frac{2}{36k^2-1}\cos\frac{6k+1}{2}\gamma\cos\frac{6k-1}{2}\gamma\cos(2\alpha+\gamma)}.$$

Для схемы с разделяющей катушкой $B = 1$, для мостовой схемы $B = 2$.

Средняя эквивалентная индуктивность системы переменного тока для схемы с разделяющей катушкой

$$L_f = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{3\gamma}{4\pi}\right) L,$$

для мостовой схемы

$$L_f = \left(2 - \frac{3\gamma}{2\pi}\right) L,$$

L — индуктивность одной фазы цепи переменного тока. Эти формулы справедливы для режима поочередного горения двух и трех вентилей.

Литература

1. И. Л. Каганов. Инвертирование постоянного тока в трехфазный. Госэнергоиздат, 1941.

2. С. Б. Васютинский. Анализ гармонических составляющих выпрямленного тока ионного преобразователя, содержащего резонансные фильтры. Труды ЛПИ им. Калинина, № 3, 1953.

3. М. П. Костенко, Л. Р. Неймана и Г. И. Блавдзевич. Электромагнитные процессы в системах с мощными выпрямительными устройствами. Изд. Академии наук СССР, 1946.

4. М. Г. Шехтман. Оптимальные характеристики схемы передачи энергии постоянным током. Диссертация ЛПИ им. Калинина, 1947.

5. К. А. Круг. Электромагнитные процессы в установках с управляемыми ртутными выпрямителями. ОНТИ, 1935.

[17.2.1956]

◇ ◇ ◇

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Определение на фазовой плоскости возможности ресинхронизации синхронного двигателя

Кандидат техн. наук **В. Н. ШЕСТОПАЛОВ**

Институт электротехники Академии наук УССР

При проектировании синхронного привода часто возникает задача о возможности ресинхронизации нагруженного двигателя при кратковременном перерыве питания. От результата, полученного при решении этой задачи, зависит выбор схем пуска и возбуждения двигателя.

Параметры двигателя существенным образом зависят от положения ротора и его относительной скорости вращения. Поэтому линейные методы решения задачи становятся непригодными. Применение метода последовательных интервалов, позволяя учесть зависимость параметров от положения ротора и его скорости вращения, является затруднительным, тем более, что при решении задачи приходится выполнять большое количество вариантов с различным временем восстановления напряжения. Наиболее просто задача о ресинхронизации синхронной машины может быть решена на фазовой плоскости [Л. 1 и 2]. Как показано в [Л. 2], для решения вопроса о ресинхронизации синхронного генератора не требуется построения полного фазового портрета. Достаточно построить на фазовой плоскости две сепаратрисы, проходящие через особую точку типа седла (точку неустойчивого равновесия). По расположению этих сепаратрис можно составить полное суждение о возможности ресинхронизации генератора.

Решение вопроса о ресинхронизации двигателя является еще более простым; для этого необходимо на фазовой плоскости построить лишь одну основную сепаратрису, проходящую через точку неустойчивого равновесия в нижней полуплоскости фазового портрета. Построение сепаратрисы в верхней полуплоскости фазового портрета синхронного двигателя не имеет практического смысла, так как скорость синхронного двигателя не может быть больше синхронной скорости (если не рассматривать режим качаний).

Сепаратриса представляет собой фазовую кривую, которая разделяет на фазовой плоскости области с различными типами траекторий изображающей точки. Главной особенностью основной сепаратрисы является прохождение ее через точку неустойчивого равновесия. Последнее обстоятельство и позволяет выбрать основную сепаратрису среди других фазовых кривых.

В переходном режиме движение машины может быть описано нелинейным дифференциальным уравнением второго порядка:

$$J\frac{d^2\theta}{dt^2} + D\frac{d\theta}{dt} + M_н = M_{эм},$$

где J — инерционная постоянная;
D — демпферный коэффициент;
θ — угол между вектором напряжения и продольной осью машины;
$M_{эм}$ — момент синхронизирующих сил;
$M_н$ — момент нагрузки.

Зависимость момента нагрузки от скорости (рис. 1) может быть для малых скольжений в первом приближении выражена следующим образом:

$$M_н = M_0 - \beta y, \qquad (1)$$

где y — скорость относительного движения ротора;
$\beta = \frac{M_0 - M_1}{y}$ — коэффициент пропорциональности.

Скорость относительного движения ротора

$$y = \frac{d\theta}{dt},$$

откуда

$$\frac{1}{dt} = \frac{y}{d\theta}. \qquad (2)$$

С учетом последних выражений уравнение движения записывается в следующем виде:

$$Jy\frac{dy}{d\theta} + (D - \beta)y - M_{эм} + M_н = 0.$$

Отсюда находим:

$$\frac{dy}{d\theta} = \frac{M_{эм} - M_н - y(D - \beta)}{Jy}. \qquad (3)$$

Уравнение (3) является уравнением касательной к любой фазовой кривой, в том числе и к основной сепаратрисе. Наиболее просто сепаратриса может быть построена методом отрезков касательных [Л. 2].

В точке неустойчивого равновесия электромагнитный момент двигателя уравновешивается моментом нагрузки ($M_{эм} = M_н$), и скорость относительного движения y равна нулю. Поэтому непосредственное решение уравнения (3) приводит к неопределенности типа $\frac{0}{0}$.

После раскрытия неопределенности получим:

$$\left(\frac{dy}{d\theta}\right)_{y=0} = -\frac{(D - \beta)}{J}.$$

Попутно отметим, что если построение сепаратрисы производится в осях, где угол откла-

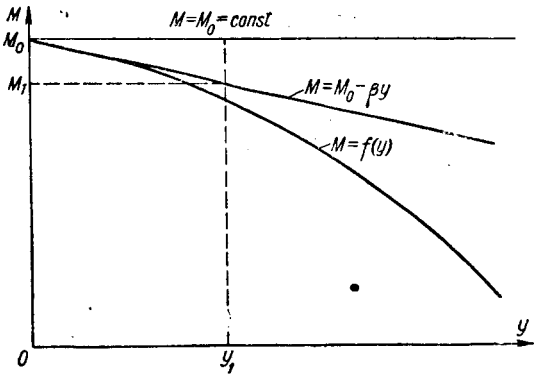


Рис. 1.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

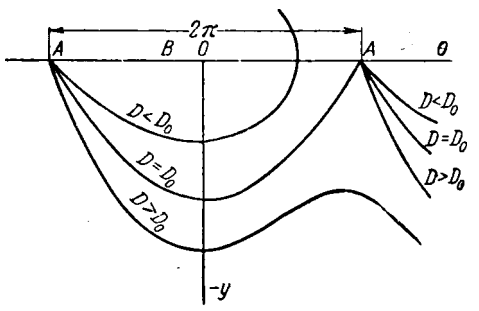


Рис. 2.

дывается в радианах (масштабный коэффициент k_θ), а угловая скорость в радианах в секунду (масштабный коэффициент k_y), то уравнение (3) приобретает следующий вид:

$$\frac{dy}{d\theta} = 314\,\frac{k_y}{k_\theta}\,\frac{M_{эм} - M_н - y(D-\beta)}{Jy}\ [1/сек]. \qquad (3а)$$

В зависимости от величины демпферного коэффициента синхронного двигателя возможны три варианта прохождения сепаратрисы (рис. 2).

Если демпферный коэффициент больше критического ($D > D_0$), то сепаратриса, проходя через точку неустойчивого равновесия (точку A), в дальнейшем не пересекает ось θ и не касается ее. Поэтому ресинхронизация двигателя возможна в любой момент восстановления напряжения питания, т. е. при любых начальных условиях. Возможен также асинхронный пуск такого двигателя.

При критическом значении демпферного коэффициента ($D = D_0$) сепаратриса, выходя из точки неустойчивого равновесия, через 2π радиан снова пересекает ось θ в следующей особой точке типа седла. Возможность ресинхронизации в этом случае уже зависит от начальных условий восстановления напряжения. Если изображающая точка в момент восстановления напряжения окажется в области, ограниченной сепаратрисой и осью θ (область возможной ресинхронизации), то двигатель ресинхронизируется. Если изображающая точка к моменту восстановления напряжения выйдет из указанной области, то ресинхронизации не наступит и возникнет процесс установившегося асинхронного хода, в котором мгновенное значение скорости двигателя будет совершать колебания относительно некоторого постоянного значения.

Ресинхронизация двигателя в этом случае может быть обеспечена его форсировкой. Изменение возбуждения двигателя изменяет вид сепаратрисы. При увеличении возбуждения растет расстояние между точкой неустойчивого равновесия (точка A) и точкой устойчивого равновесия (точка B), что приводит сепаратрису к типу, при котором $D > D_0$. Величина необходимой форсировки при критическом демпферном коэффициенте не будет слишком большой. Достаточно небольшого увеличения возбуждения, чтобы произошла ресинхронизация.

Основная сепаратриса для случая, когда демпферный коэффициент меньше критического ($D < D_0$), пересекает ось θ на расстоянии, меньшем 2π от точки A. В этом случае, как и в предыдущем, ресинхронизация возможна, если питание двигателя восстановлено в тот момент, когда изображающая точка находится в области между сепаратрисой и осью θ. Если изображающая точка в момент восстановления напряжения окажется вне этой области, то возникнет асинхронный ход двигателя, который может закончиться полной остановкой двигателя. Форсировка и в этом случае может облегчить и ускорить процесс ресинхронизации. Однако она должна быть достаточно сильной. Другим мероприятием, облегчающим ресинхронизацию, может быть разгрузка двигателя. При уменьшении нагрузки двигателя, как и при форсировке, расстояние между точками A и B увеличивается.

Таким образом, о возможности ресинхронизации можно судить по виду основной сепаратрисы. Если построенная сепаратриса оказывается первого или второго типа, то ресинхронизация происходит достаточно легко, если сепаратриса оказывается третьего типа, то возможность ресинхронизации существенным образом зависит от того, в какой момент времени произойдет восстановление напряжения.

Для решения вопроса о ресинхронизации при $D < D_0$ следует на фазовой плоскости построить траекторию изображающей точки в режиме свободного выбега. В этом режиме момент нагрузки уравновешивается только моментом сил инерции:

$$J\frac{dy}{dt} = M_0 - \beta y. \qquad (4)$$

Исключив время, при помощи равенства (2) получим:

$$Jy\frac{dy}{d\theta} = M_0 - \beta y.$$

Отсюда находим:

$$\frac{dy}{d\theta} = \frac{M_0 - \beta y}{Jy}. \qquad (5)$$

Уравнение (5) представляет уравнение касательной к кривой выбега. Построение кривой выбега, как и построение сепаратрисы, наиболее просто осуществить методом отрезков касательных. Если траектория выбега строится в тех же осях, что и сепаратриса, то с учетом размерностей и масштабных коэффициентов получим:

$$\frac{dy}{d\theta} = 314\,\frac{k_y}{k_0}\,\frac{M_0 - \beta y}{Jy}\ [1/сек]. \qquad (5а)$$

Построение кривой выбега начинается из точки устойчивого равновесия (точка B) и заканчивается после пересечения сепаратрисы.

Следует отметить, что уравнение (5) решается непосредственно и потому не обязательно строить кривую выбега по этому уравнению. Интегрирование уравнения (5) дает

$$\theta - \theta_B = J\left(\frac{M_0}{\beta^2}\ln\frac{M_0}{M_0 - \beta y} - \frac{J}{\beta}\right).$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

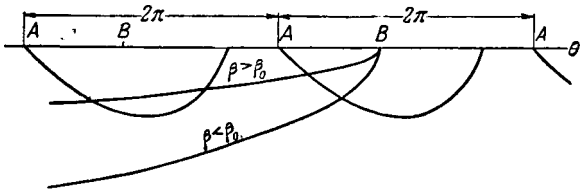


Рис. 3.

Вычисления кривой выбега по последнему уравнению более трудоемки и менее точны, чем при построении кривой методом касательных.

В зависимости от величины коэффициента β возможно различное расположение кривых выбега на фазовой плоскости (рис. 3).

При $\beta < \beta_0$ кривая выбега пересекает сепаратрису лишь 1 раз. Поэтому ресинхронизация возможна только в том случае, если изображающая точка находится на участке между точкой B и точкой пересечения кривой выбега и сепаратрисы.

Если коэффициент β больше некоторого критического значения β_0, то траектория выбега пересекает область возможной ресинхронизации несколько раз (каждый раз после проворота ротора на два полюсных деления). Вследствие этого может оказаться, что при меньшем времени выбега восстановление напряжения не приведет к ресинхронизации, а при большем времени двигатель ресинхронизируется. Вообще, если восстановление напряжения происходит после нечетного числа прохождений изображающей точки через основную сепаратрису, то ресинхронизация не наступит. Наоборот, если восстановление напряжения произойдет после четного числа пересечений, то двигатель ресинхронизируется.

Рассмотрим вопрос определения моментов времени прохождения изображающей точки в режиме выбега через сепаратрису. Для этого вернемся к уравнению (4). Интегрирование после разделения переменных дает:

$$t = C - \frac{1}{\beta} \ln (M_0 - \beta y).$$

Постоянная интегрирования C определяется из начальных условий:

при $t = 0$, $y = 0$, $C = \frac{J}{\beta} \ln M_0$.

После исключения постоянной интегрирования получим:

$$t = \frac{J}{\beta} \ln \frac{M_0}{M_0 - \beta y} \qquad (6)$$

или (с учетом размерностей)

$$t = \frac{J}{314\beta} \ln \frac{M_0}{M_0 - \beta y} \ [сек]. \qquad (6а)$$

Для определения времени перехода изображающей точки через сепаратрису следует подставить в последнее уравнение значение скорости, соответствующей точке перехода.

Решение задачи о ресинхронизации синхронного двигателя на фазовой плоскости не является сложным и не требует больших затрат времени. Вместе с тем использование фазовой плоскости позволяет учитывать явнополюсность двигателя, асимметрию его демпферной клетки, нелинейность синхронизирующего момента, зависимость нагрузки от скорости и другие факторы.

Пример. Для иллюстрации метода расчета рассмотрим возможность ресинхронизации двигателя со следующими параметрами (приведенными к номинальной мощности и номинальному напряжению):

$$x_d = 0{,}994;\ x'_d = 0{,}262;\ x_q = 0{,}534;$$
$$x''_d = x''_q = 0{,}170;$$
$$J = 4{,}5\ сек;\ T'_d = 0{,}412\ сек;$$
$$T''_d = T''_q = 0{,}0136\ сек.$$

Нагрузка двигателя характеризуется следующими данными:

$$M_0 = 1{,}0 \text{ и } \beta = 0{,}0064.$$

На основании предварительно проведенного расчета было определено, что точка устойчивого равновесия соответствует углу $\theta_B = -0{,}41$ *рад* и точка неустойчивого равновесия соответствует углу $\theta_A = -2{,}16$ *рад*, э. д. с. $E_d = 1{,}66$. Демпферный коэффициент определим по формуле П. С. Жданова [Л. 3]:

$$D = U^2 \left[\sin^2\theta \frac{x'_d - x''_d}{x'_d\, x''_d} \frac{T''_d}{1 + (yT''_d)^2} + \right.$$
$$+ \cos^2\theta \frac{x_q - x''_q}{x_q x''_q} \cdot \frac{T''_q}{1 + (yT''_q)^2} +$$
$$\left. + \frac{1}{2} \frac{x_d - x'_d}{x_d x'_d} \frac{T'_d}{1 + (yT'_d)^2} \right]. \qquad (7)$$

При определении электромагнитного момента будем учитывать явнополюсность двигателя:

$$M_{эм} = \frac{E_d U}{x_d} \sin\theta +$$
$$+ \frac{U^2}{2} \frac{x_d - x_q}{x_d x_q} \sin 2\theta. \qquad (8)$$

Построение сепаратрисы, как уже упоминалось, начинаем из точки неустойчивого равновесия (координаты $\theta_A = -2{,}16$; $y_A = 0$). Построение производим в осях, где единица длины соответствует 1 *рад* и 5 $\frac{1}{сек}$.

Демпферный коэффициент для этой точки

$$D_{(1)} = \left[\sin^2(-2{,}16) \frac{0{,}262 - 0{,}170}{0{,}262 \cdot 0{,}170} \cdot \frac{0{,}0136}{1 + (0{\cdot}0{,}0136)^2} + \right.$$
$$+ \cos^2(-2{,}16) \frac{0{,}534 - 0{,}170}{0{,}534 \cdot 0{,}170} \cdot \frac{0{,}0136}{1 + (0{\cdot}0{,}0136)^2} +$$
$$\left. + \frac{1}{2} \frac{0{,}994 - 0{,}262}{0{,}994 \cdot 0{,}262} \cdot \frac{0{,}412}{1 + (0{\cdot}0{,}412)^2} \right] = 0{,}6142.$$

Находим наклон касательной в этой точке

$$\left(\frac{dy}{d\theta}\right)_{(1)} = -314 \frac{1{,}0}{5{,}0} \cdot \frac{0{,}6142 - 0{,}0064}{4{,}5} = -8{,}65.$$

Из точки A (рис. 4) проведем в нижней полуплоскости прямую, тангенс угла наклона которой составляет:

$$\operatorname{tg} \alpha_{(1)} = -8{,}65.$$

На этой прямой выберем вторую точку (координаты ее $\theta_2 = -2{,}145$; $y_2 = -1{,}0$). При выборе этой точки и всех последующих следует учитывать, что для построения кривой мы пользуемся методом касательных, и поэтому выбор точки следует производить с учетом кривизны кривой (чем больше кривизна, тем меньшим должен быть интервал между точками).

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

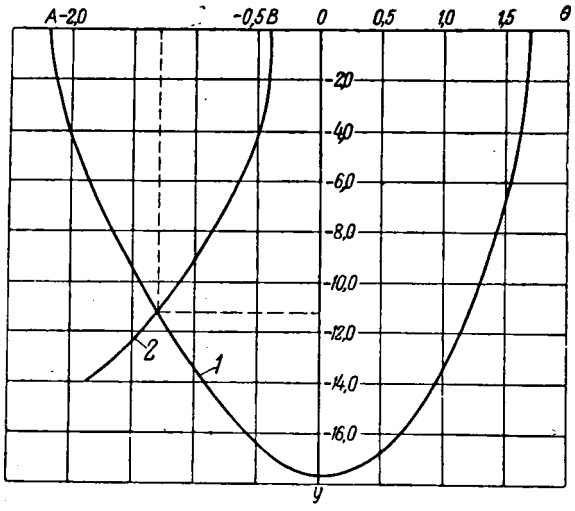


Рис. 4.

По формуле (7) находим значение демпферного коэффициента для второй точки:

$$D_{(2)} = 0{,}53.$$

Момент синхронизирующих сил [по формуле (8)]

$$M_{эм\,(2)} = \frac{1{,}66 \cdot 1{,}0}{0{,}994} \sin(-2{,}145) +$$

$$+ \frac{1}{2} \frac{0{,}994 - 0{,}534}{0{,}994 \cdot 0{,}534} \sin(1{,}99) = -1{,}028.$$

По формуле (3а) определим наклон касательной к сепаратрисе во второй точке:

$$\left(\frac{dy}{d\theta}\right)_{(2)} = 314 \frac{1{,}0}{5{,}0} \times$$

$$\times \frac{-1{,}028 + 1{,}0 + 1{,}0\,(0{,}53 - 0{,}0064)}{-4{,}5 \cdot 1{,}0} = -7{,}7.$$

Из второй точки проводим прямую под углом

$$\alpha_{(2)} = \operatorname{arctg}(-7{,}7).$$

На этой прямой выбираем третью точку, для которой проводим аналогичный расчет, и т. д. до построения сепаратрисы. Построенная сепаратриса имеет вид, представленный на рис. 4 (кривая *1*). Вид сепаратрисы свидетельствует о том, что ресинхронизация этого двигателя будет зависеть от того, насколько скоро восстановится напряжение. Для определения времени перехода двигателя из области возможной ресинхронизации в область невозможной ресинхронизации построим на фазовой плоскости кривую выбега. Для этого, задавая последовательно различные значения относительной скорости, вычисляем по формуле (5а) в каждой точке наклон касательной к кривой выбега. Построение начинается из точки устойчивого равновесия (координаты $\theta_B = -0{,}41$; $y_B = 0$).

Для первой точки получим:

$$\left(\frac{dy}{d\theta}\right)_{(1)} = 314 \frac{1{,}0}{5{,}0} \cdot \frac{1{,}0 - 0 \cdot 0{,}0064}{45 \cdot 0} = \infty.$$

Наклон во второй точке будем вычислять при $y_{(2)} = 1{,}0$:

$$\left(\frac{dy}{d\theta}\right)_{(2)} = 314 \frac{1{,}0}{5{,}0} \cdot \frac{1{,}0 - 0{,}0064 \cdot 1{,}0}{4{,}5 \cdot 1{,}0} = 13{,}9.$$

Расчет продолжаем до тех пор, пока кривая выбега не пересечет сепаратрису (кривая *2* на рис. 4). Координаты точки пересечения

$$\theta = -1{,}26 \text{ и } y = -11{,}3.$$

Таким образом, для того чтобы двигатель ресинхронизировался, необходимо, чтобы перерыв питания не превышал

$$t = \frac{4{,}5}{314 \cdot 0{,}0064} \ln \frac{1}{1 - 0{,}0064 \cdot 11{,}3} \approx 0{,}17 \text{ сек}.$$

Если напряжение питания восстановится позднее, чем через 0,17 *сек*, то ресинхронизация двигателя станет невозможной и потребуется переход на схему пуска.

Настоящая работа проводилась под руководством доктора техн. наук В. Л. Иносова, которому автор выражает свою признательность.

Литература

1. А. А. Андронов и С. Э. Хайкин. Теория колебаний. ОНТИ, 1937.
2. В. Л. Иносов и В. Е. Крутикова. Исследование условий втягивания в синхронизм возбужденных генераторов, идущих несинхронно с сетью. Сборник трудов Института электротехники АН УССР, вып. 13, 1956.
3. П. С. Жданов. Вопросы эксплуатации электрических систем. Синхронизация машин при нарушениях устойчивости. Электричество, № 6, 1934.

[11.5.1956]

◇ ◇

Расчет анодных делителей тока

Кандидат техн. наук Н. М. МАСЛЕННИКОВ
Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина

Назначение делителя тока — равномерно распределять ток между параллельно включенными анодами и вентилями преобразователя. Несмотря на широкое применение анодных делителей тока, в опубликованной литературе нет методов их расчета.

Двуханодный делитель тока представляет собой замкнутый сердечник с намотанными на нем навстречу друг другу двумя обмотками (рис. 1). Параметры делителя тока целесообразно определять, исходя из условия индуктирования в его обмотках напряжения, большего напряжения зажигания вентиля в течение заданного времени разброса зажигания, или исходя из минимальной величины неравномерности анодных токов, получающейся за счет неодинаковых падений напряжения в дуге вентилей. Может быть несколько причин разброса моментов зажигания: неодновременная подача сеточных импульсов, запаздывание зажигания анода по отношению к сеткам, неодинаковые напряжения зажигания анодов.

Параллельно включенные вентили должны зажигаться с разбросом, не большим 0,1 ... 0,5° эл., тогда будет достигнута минимальная неравномерность распределения анодных токов, а размеры делителя тока будут не слишком большими.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

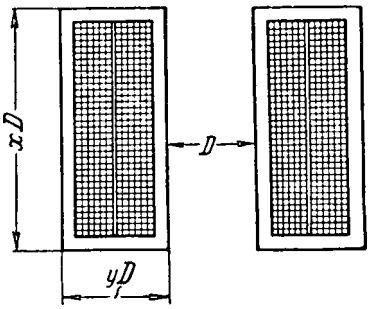


Рис. 1.

Делители тока, предназначенные для вентилей, разброс зажигания которых сведен до минимума (0,1 ... 0,5° эл.), или предназначенные для высоковольтных вентилей, для зажигания которых требуется относительно высокое напряжение, целесообразно делать без воздушного зазора в сердечнике. Как показывает опыт, введение даже минимального воздушного зазора, несмотря на снижение остаточной индукции, приводит к уменьшению магнитной проницаемости, а следовательно, и к уменьшению максимального значения напряжения на обмотках делителя тока.

Делители тока, предназначенные для вентилей, у которых разброс зажигания велик (порядка 2° эл.), целесообразно делать с воздушным зазором. В противном случае по истечении времени, соответствующего 2° эл., сердечник делителя будет насыщен и напряжение на его обмотках недостаточным для зажигания вентиля. Однако при таком разбросе зажигания неравномерность распределения анодных токов будет значительной. Разброс зажигания, доходящий до 2° эл., свидетельствует о неудовлетворительной работе схемы управления или о недостатках конструкции вентиля.

На передачах энергии постоянным током возможно опрокидывание инвертора, в результате чего длительность протекания анодных токов значительно увеличивается, а следовательно, должна увеличиться и неравномерность распределения. Однако этого случая опасаться не следует, поскольку при опрокидывании инвертора анодные токи достигают больших значений и вентили уже работают не на падающей, а на возрастающей вольтамперной характеристике дуги.

Расчет целесообразно вести на наиболее тяжелый случай, когда в течение одного периода происходит пропуск зажигания вентиля, а в следующий период этот вентиль зажигается с опозданием по отношению к первому вентилю. Это означает, что для делителя тока без воздушного зазора в сердечнике расчет будет производиться по кривой намагничивания, начинающейся с максимального значения остаточной индукции B_{m0} (рис. 2).

Обозначим мгновенное значение напряжения на обмотке трансформатора в момент зажигания первого вентиля через U_a. В первый момент к одной обмотке делителя тока прикладывается напряжение U_{L0}, определяемое для периода коммутации по формуле:

$$U_{L0} = \frac{U_a - U_a}{2L_\phi + L_0} L_0, \qquad (1)$$

где U_a — падение напряжения в дуге первого вентиля;

L_ϕ — индуктивность рассеяния фазы трансформатора;

L_0 — начальная индуктивность обмотки делителя тока при наличии остаточной индукции в сердечнике:

$$L_0 = \frac{\omega^2 S}{l} \mu_0' \text{ [гн]}. \qquad (2)$$

Пренебрегая рассеянием между обмотками, можно положить, что в обмотке делителя незажегшегося вентиля будет индуктироваться напряжение $+U_{L0}$. В результате, напряжение между анодом и катодом незажегшегося вентиля будет:

$$2U_{L0} + U_a.$$

При расчете учитываем только напряжения, индуктируемые током коммутации, а напряжениями, индуктируемыми разрядным током распределенных емкостей схемы и емкостей демпфирующих контуров, пренебрегаем, так как эти токи не поддаются точному учету.

Обозначим максимальное напряжение между анодом и катодом, которое необходимо для зажигания вентиля, через U_p. Зажигание второго вентиля будет обеспечено при любой нагрузке, если

$$U_p \leqslant 2U_{L0} + U_a. \qquad (3)$$

Напряжение, индуктируемое в обмотках делителя тока, затем будет увеличиваться и пройдет через максимум. Максимальное значение этого напряжения можно определить приближенно по формуле (1), подставив в нее $L_{макс}$ вместо L_0. Метод определения мгновенных значений напряжения на обмотках делителя тока изложен в [Л. 1]. Индуктивность обмоток должна быть такова, чтобы во время разброса зажигания напряжение между анодом и катодом незажегшегося вентиля было больше U_p.

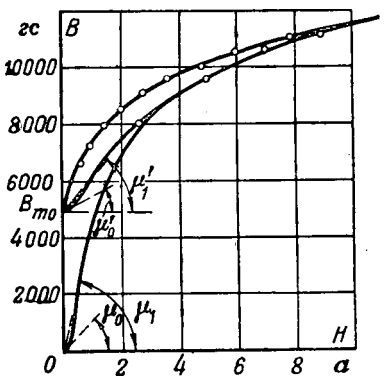


Рис. 2. Кривые намагничивания трансформаторной стали марки Э4АА ($\mu_1 = 4\,500 \cdot 10^{-8}$ гн/см; $\mu_1' = 1\,240 \cdot 10^{-8}$ гн/см; $\mu_0 = 1\,080$ гн/см; $\mu_0' = 540$ гн/см).

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Определение конструктивных данных делителя тока можно производить, исходя из минимума его стоимости. При этом получается наиболее простое и быстрое решение, не требующее построения вспомогательных расчетных кривых. Определение размеров делителя тока, исходя из его мощности, не представляется возможным, поскольку мощность делителя тока является производной, а не исходной величиной.

Обозначим через D диаметр стержня сердечника, *см*, xD — его высоту, yD — ширину обмотки (рис. 1). Приближенно $x = 5{,}5\ y$.

Считаем, что нам заданы коэффициенты заполнения сечения сердечника $\sigma_{ст}$ и коэффициент заполнения окна $\sigma_м$. Коэффициент $\sigma_{ст}$ зависит от числа ступеней сечения стержня. В делителях тока число ступеней следует брать не больше трех. Коэффициент $\sigma_м$ в основном зависит от значения напряжения, которое может индуктироваться в обмотках при пропуске зажигания. Его приближенное значение следует брать по таблице в [Л. 2].

Стоимость активных материалов делителя тока можно выразить формулой

$$C = c_м G_м + c_{ст} G_{ст} =$$

$$= c_{ст}(BE^{1/3}D^{4/3} + pAE^{2/3}D^{-1/3} + pAED^{-2}). \quad (4)$$

Принятые обозначения:

$c_м$ и $c_{ст}$ — стоимости 1 *кг* меди и трансформаторной стали;

p — их отношение.

Вес меди двух обмоток

$$G_м = A(E^{2/3}D^{-1/3} + ED^{-2}), \quad (5)$$

вес стали

$$G_{ст} = BE^{1/3}D^{4/3}; \quad (6)$$

$$A = 2 \cdot \pi 5{,}5\sigma_м\gamma_м \cdot 10^{-3}; \quad (7)$$

$$B = \frac{\pi}{4} \cdot 2{,}8 \cdot 7{,}5\sigma_{ст}\gamma_{ст} \cdot 10^{-3}; \quad (8)$$

здесь $\gamma_м$ — удельный вес меди, *кг/дм*^{3};

$\gamma_{ст}$ — удельный вес трансформаторной стали, *кг/дм*^{3}.

Если на сердечнике размещаются обмотки двух анодов одной фазы, то

$$E = \frac{4 \cdot 2{,}8 \cdot 7{,}5 I^2 L_0}{\pi 5{,}5^2 \cdot 10^4 \sigma_м^2 \sigma_{ст} \delta^2 \mu_0'}, \quad (9)$$

где I — действующее значение анодного тока;

δ — плотность тока в обмотке, *а/мм*^{2}.

Если на сердечнике размещаются обмотки четырех анодов двух фаз трансформатора, то значение E берется в 4 раза больше.

Дифференцируем (4) по D и находим минимум стоимости. Уравнение с искомым D будет иметь вид:

$$4BE^{1/3}D^{14/3} = 6pAED^{4/3} + pAE^{2/3}D^3. \quad (10)$$

Из уравнения (11) D легко определяется подбором.

Затем определяется

$$y = \frac{E^{1/3}}{D^{5/3}}, \quad (11)$$

ширина окна и высота стержня.

Длина средней индукционной линии, *см*,

$$l \approx 2{,}8 \cdot 7{,}5yD. \quad (12)$$

Число витков одной обмотки

$$w = \frac{100 \cdot 5{,}5\sigma_м \delta y^2 D^2}{I}. \quad (13)$$

Сечение стержня, *см*^{2},

$$S = \frac{\pi D^2 \sigma_{ст}}{4}. \quad (14)$$

После определения конструктивных данных делителя тока целесообразно рассчитать напряжения, индуктируемые в обмотках при различных режимах работы вентиля. Если указанные напряжения окажутся значительно больше или меньше требуемого значения, то необходимо повторить расчет, задавшись меньшим или бо́льшим значением L_0. Для уменьшения индуктивного сопротивления всего делителя тока обмотки анодов вматывают одну в другую.

В конструктивном отношении делитель тока имеет много общего с трансформатором; для возможности суждения о его размерах целесообразно ввести понятие «мощность делителя тока». При нормальной работе индукция и потери в сердечнике делителя тока близки к нулю. Заменим делитель тока эквивалентным трансформатором, в обмотках которого индуктируется условное напряжение. Действующее значение этого напряжения определим обычным способом. При подсчете необходимо учитывать только половину витков. В результате мощность делителя тока выразится следующей формулой:

$$P = EI = 4{,}44fwBSI \cdot 10^{-8}\ [ва], \quad (15)$$

где w — половина намотанных витков;

I — действующее значение тока одной обмотки.

На практике может встать вопрос, каких размеров должен быть делитель тока, чтобы при известной разности падений напряжения в дуге неравномерность распределения средних значений анодных токов была не больше заданного значения.

В нормально спроектированных делителях тока, когда анодные токи отличаются друг от друга на несколько процентов, неравномерность распределения средних значений анодных токов может быть определена по формуле

$$\frac{I_I}{I_{II}} = \frac{I_d + \frac{U_{aII} - U_{aI}}{2T(L+M)}t^2}{I_d - \frac{U_{aII} - U_{aI}}{2T(L+M)}t^2}, \quad (16)$$

где U_{aI} и U_{aII} — падения напряжения в дуге вентилей;

L — индуктивность обмотки;

M — взаимоиндуктивность обмоток;

t — среднее значение времени горения вентилей;

T — длительность периода.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

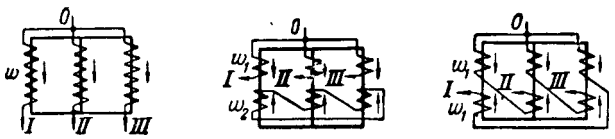


Рис. 3. Схемы соединения обмоток треханодного делителя тока.

Пренебрежем рассеянием между обмотками, тогда $L = M$. Затем предположим, что во время работы сердечник делителя тока не насыщен и L является постоянной величиной. Приравнивание L постоянной величине означает спрямление характеристики намагничивания до точки ее перегиба. Далее, из формулы (16) определим L. В формулу (9) подставим L и μ_1 вместо L_0 и μ'_0. Находим вышеприведенным способом конструктивные параметры w, S и l.

По формулам, аналогичным приведенным, можно определить конструктивные данные треханодного делителя тока. Разница будет лишь в значениях коэффициентов A, B и E.

Для треханодного делителя тока возможны три схемы соединения обмоток (рис. 3). При расположении на каждом стержне по одной обмотке будет наблюдаться некоторая неравномерность в распределении токов. Индуктивное сопротивление такого делителя велико вследствие большого рассеяния между обмотками. При добавлении короткозамкнутой обмотки индуктивное сопротивление делителя уменьшается, но расход меди удвоится. В обеих схемах при запаздывании зажигания двух анодов напряжения, индуктируемые в обмотках незажегшихся анодов, неодинаковы. Схема с соединением обмоток в зигзаг свободна от перечисленных недостатков.

В заключение следует отметить, что по приведенной выше методике было рассчитано и изготовлено несколько образцов анодных делителей тока, которые в дальнейшем удовлетворительно работали в высоковольтной преобразовательной установке.

Пример. Рассчитать двухanодный делитель тока, предназначенный для параллельной работы вентилей в трехфазной схеме от трансформатора, со следующими данными: $U_\phi = 17\,300$ *в*, $L_\phi = 0{,}0357$ *гн*. Для данных образцов вентилей расчетное напряжение зажигания $U_p = 1\,000$ *в*, действующее значение анодного тока при работе в трехфазной схеме $I = 520$ *а*.

Задаемся тем условием, чтобы расчетное напряжение зажигания индуктировалось в обмотках делителя тока при угле регулирования $\alpha = 13°$ эл. Следовательно,

$$U_a = \sqrt{3}\,\sqrt{2}\,U_\phi \sin 13° = 9\,550 \text{ в}.$$

Согласно формуле (3)

$$U_{L0} \approx \frac{U_p}{2} = 500 \text{ в}.$$

По формуле (1) определим начальную индуктивность обмотки делителя тока L_0, которая обеспечит скачок напряжения U_L:

$$U_{L0} \approx U_a \frac{L_0}{2L_\phi + L_0};$$

$$500 = 9\,550 \frac{L_0}{2 \cdot 0{,}0357 + L_0},$$

откуда $L_0 = 0{,}00395$ *гн*.

По формулам (7), (8) и (9) определяем коэффициенты A, B и E:

$$A = 2\pi\, 5{,}5 \cdot 0{,}2 \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-3} = 0{,}0615;$$

$$B = \frac{\pi}{4} \cdot 2{,}8 \cdot 7{,}5 \cdot 0{,}71 \cdot 7{,}55 \cdot 10^{-3} = 0{,}0885;$$

$$E = \frac{4 \cdot 2{,}8 \cdot 7{,}5 \cdot 520^2 \cdot 0{,}00395}{\pi \cdot 5{,}5^2 \cdot 10^4 \cdot 0{,}2^2 \cdot 0{,}71 \cdot 3{,}25\ 540 \cdot 10^{-8}} = 58\,200.$$

Подставив коэффициенты в формулу (10), определяем диаметр стержня $D = 14{,}2$ *см*. Затем находим остальные конструктивные данные делителя, при которых начальная индуктивность обмотки $L_0 = 0{,}00395$ *гн*:

$$y = \frac{58\,200^{1/3}}{14{,}2^{5/3}} = 0{,}465;$$

$$l \approx 2{,}8 \cdot 7{,}5 \cdot 0{,}465 \cdot 14{,}2 = 140 \text{ см};$$

$$w = \frac{100 \cdot 5{,}5 \cdot 0{,}2 \cdot 3{,}25 \cdot 0{,}465^2 \cdot 14{,}2^2}{520} = 30;$$

$$S = \frac{\pi \cdot 14{,}2^2}{4} \cdot 0{,}71 = 113 \text{ см}^2.$$

Вес меди и стали:

$$G_м = 0{,}0615\,(58\,200^{2/3} \cdot 14{,}2^{-1/3} + 58\,200 \cdot 14{,}2^{-2}) = 56 \text{ кг};$$

$$G_{ст} = 0{,}0885 \cdot 58\,200^{1/3} \cdot 14{,}2^{4/3} = 118 \text{ кг}.$$

Мощность делителя тока

$$P = 4{,}44 \cdot 50 \cdot 30 \cdot 10^4 \cdot 113 \cdot 520 \cdot 10^{-8} = 39 \text{ ква}.$$

Литература

1. Ф. И. Бутаев и Н. М. Масленников. Распределение тока между параллельно включенными анодами и вентилями. Электричество, № 2, 1956.

2. Н. И. Булгаков. Расчет трансформаторов. Госэнергоиздат, стр. 302, 1950.

[3.9.1955]

◇ ◇ ◇

Об одном преобразовании нелинейных цепей

Кандидат техн. наук П. А. ИОНКИН
Московский энергетический институт им. Молотова

В статье описывается один из способов преобразования цепей с нелинейными элементами, позволяющий при расчете довольно сложных разветвленных цепей пользоваться соотношениями, применяемыми для смешанного соединения активных и пассивных нелинейных двухполюсников. Предлагаемая автором методика расчета нелинейных цепей иллюстрируется на конкретных примерах.

Выделим для рассмотрения из произвольной цепи один узел o с несколькими ветвями, присоединенными к остальной части той же цепи в других узловых точках *1*, *2*, *3*, ..., n (рис. 1,*а*). Пусть ветвь n—o содержит нелинейный элемент $r(I)$ и э. д. с. E'. На основании теоремы о компенсации заменим напряжение $U'(I) = r(I)I$ на нелинейном элементе э. д. с. $E'(I)$, равной этому напряжению и направленной навстречу току I

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

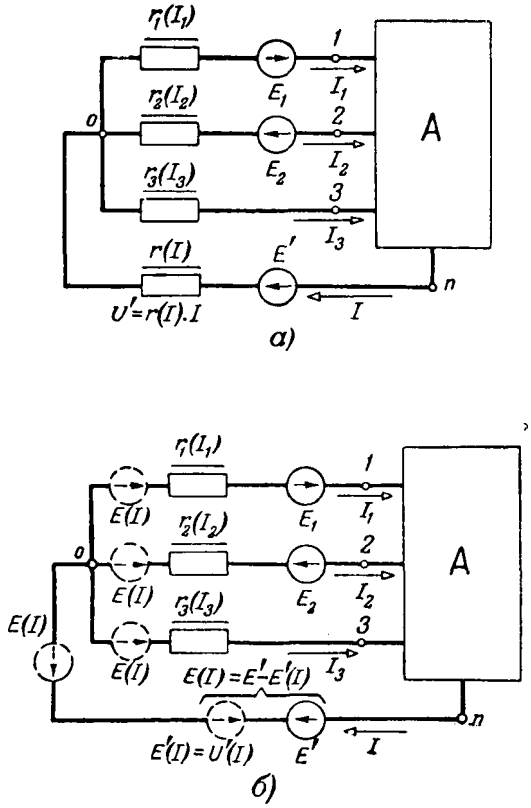


Рис. 1.

(рис. 1,б). Включим в каждую ветвь, присоединенную к узлу o, э. д. с. $E(I) = E' - E'(I)$ (рис. 1,б). В результате токи во всех ветвях, очевидно, останутся без изменения, а разность потенциалов между узлами o и n будет равна нулю и их можно объединить проводником, не обладающим сопротивлением. При этом э. д. с. $E(I)$, зависящая в общем случае от тока I, как бы переносится через рассматриваемую узловую точку во все остальные ветви, присоединенные к этому узлу (рис. 2). Рассмотрим применение такого преобразования для расчета разветвленных цепей с нелинейными элементами.

Мостовая схема. На рис. 3 изображена мостовая схема с шестью нелинейными элементами и с источниками э. д. с. во всех ветвях. Пусть известны э. д. с. и вольтамперные характеристики для всех нелинейных элементов, требуется определить токи. Заменим напряжение $U'(I) = r(I)I$ на нелинейном элементе $r(I)$ э. д. с. $E'(I) = U'(I)$, а затем перенесем через узел a эквивалентную э. д. с. $E(I) = E' - E'(I)$ в две другие ветви, присоединенные к тому же узлу, в результате чего получим схему рис. 4 в виде смешанного соединения активных нелинейных двухполюсников с эквивалентной э. д. с. $E(I)$. Для определения тока I задаемся э. д. с. E и определяем графическим путем, пользуясь схемой рис. 4, токи I_1 и I_4 или I_2 и I_3 для каждого значения этой э. д. с. Затем строим в одних и тех же осях координат характеристики $(I_1 + I_4)E$ и $I(E)$ или $(I_2 + I_3)E$ и $I(E)$. Так как ток $I = I_1 + I_4$ или $I = (I_2 + I_3)$ (рис. 3), то ордината точки пересечения характеристик $(I_1 + I_4)E$ и $I(E)$ или $(I_2 + I_3)E$ и $I(E)$ даст искомый ток I. После этого находим э. д. с. $E(I)$ и, пользуясь схемой рис. 4, определим токи в остальных ветвях мостовой схемы (приложение). Необходимо подчеркнуть, что для случая $r(I) = 0$, когда в ветви с э. д. с. E отсутствует нелинейный элемент, токи во всех ветвях мостовой схемы определяются графическим путем из эквивалентной схемы с известной э. д. с. $E(I) = E$, рис. 4 (приложение, рис. 11).

Если произвольная электрическая цепь содержит четыре нелинейных элемента, то, рассматривая линейную часть цепи относительно зажимов ветвей с нелинейными элементами в виде активного восьмиполюсника, его можно заменить эквивалентной схемой, аналогичной схеме четырехобмоточного трансформатора [Л. 3] с внешними э. д. с. во всех четырех контурах. Величины этих э. д. с. равны напряжениям на зажимах ветвей с нелинейными элементами при их одновременном размыкании. При этом следует иметь в виду, что при размыкании ветвей с нелинейными элементами конфигурация линейной части схемы не должна давать неопределенности в определении э. д. с. [Л. 2].

Затем путем простых преобразований можно получить эквивалентную схему, аналогичную рис. 3, с шестью ветвями, из которых две диагональные ветви будут содержать линейные эле-

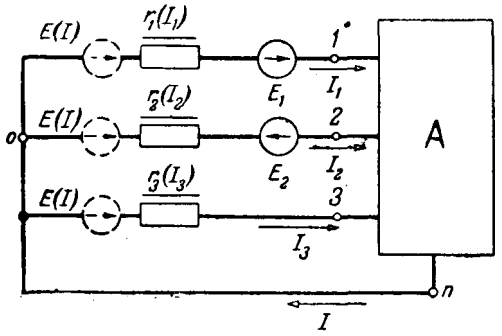


Рис. 2.

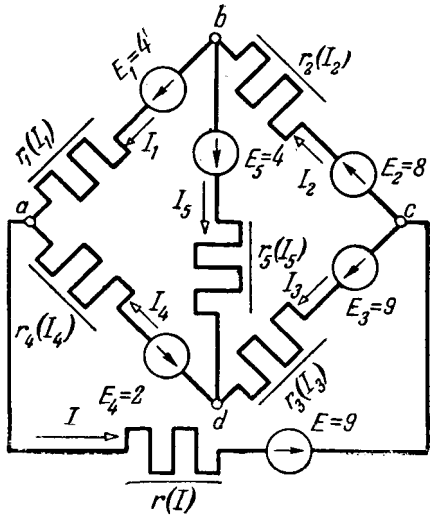


Рис. 3.

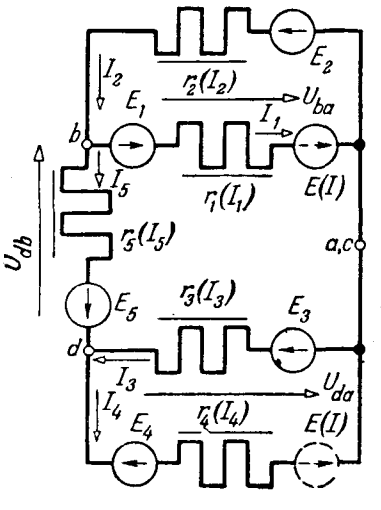


Рис. 4.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

менты, а остальные — нелинейные. Расчет такой схемы уже не представляет затруднений [1].

Схема полного пятиугольника. На рис. 5 показана схема полного пятиугольника с нелинейными элементами и источниками э. д. с. во всех ветвях. Если известны э. д. с. и вольтамперные характеристики для нелинейных элементов, то для определения токов в ветвях схемы рис. 5 заменим напряжения на зажимах первой и второй ветвей соответственно э. д. с. $E_1(I_1)$ и $E_2(I_2)$ и переведем эти э. д. с. через узлы *1* и *3* в другие ветви, примыкающие к этим узлам. В результате получим схему рис. 6,*а* в виде смешанного соединения линейных и нелинейных двухполюсников. Так как точки *1*, *2* и *3* объединяются в один узел (рис. 6,*а*), то ветвь с э. д. с. E_6 и сопротивлением $r_6(I_6)$ вместе с эквивалентными э. д. с. $E_1(I_1)$ и $E_2(I_2)$ отсоединяется от остальной части цепи и может быть представлена в виде отдельного контура рис. 6,*б* с током I_6. Затем в соответствии с вольтамперной характеристикой $E_1(I_1)$ задаемся некоторым значением э. д. с. E_1 и, принимая это значение постоянным, графоаналитическим путем определяем так же, как в схеме рис. 4, токи ветвей схемы рис. 6 для различных значений э. д. с. $E_2(I_2)$. Так как ток $I_2 = I_3 + I_{10} - I_6$ (рис. 5), то точка пересечения кривой $(I_3 + I_{10} - I_6)E_2$ с характеристикой $E_2(I_2)$ дает ток I_2. Полученное при этом значение тока $I_1 = I_5 + I_8 - I_6$ (рис. 5) в общем случае не будет удовлетворять заданной характеристике $E_1(I_1)$. Поэтому задаемся новым значением э. д. с. E_1 и опять производим такие же построения и находим новое значение тока $I_1 = I_5 + I_8 - I_6$. Произведя серию таких расчетов, получим данные для построения кривой $(I_5 + I_8 - I_6)E_1$, точка пересечения которой с заданной характеристикой $E_1(I_1)$ и даст искомое значение тока I_1. После этого определяем токи в остальных ветвях схемы рис. 6.

Отметим, что если произвольная электрическая цепь содержит пять нелинейных элементов, то, рассматривая линейную часть цепи относительно зажимов ветвей с нелинейными элементами в виде активного десятиполюсника, его можно заменить эквивалентной схемой. Затем путем преобразований легко получить эквивалентную схему для всей цепи, аналогичную схеме рис. 5, при этом все внешние ветви пятиугольника будут иметь нелинейные элементы, а все диагональные — линейные. Расчет такой схемы аналогичен расчету схемы рис. 5.

Изложенным способом легко показать, что для определения токов в схеме полного шестиугольника с нелинейными элементами во всех ветвях можно, так же как при расчете токов в ветвях пятиугольника, воспользоваться эквивалентной схемой в виде смешанного соединения

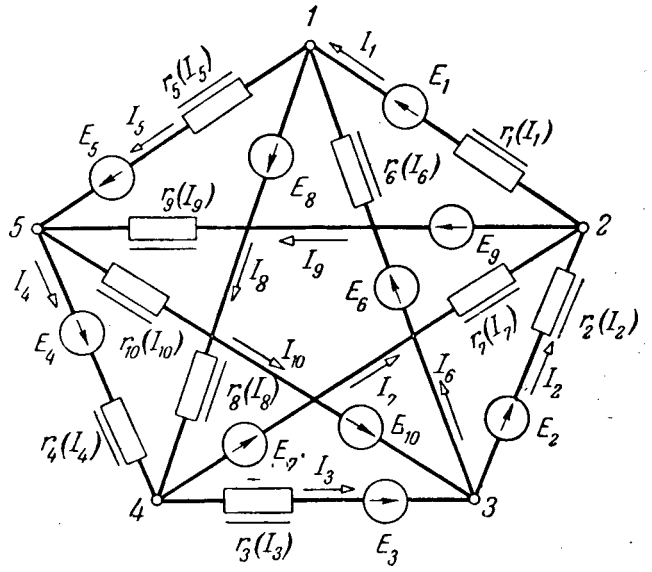


Рис. 5.

нелинейных двухполюсников. В качестве добавочных неизвестных следует ввести в схему смешанного соединения три э. д. с., заменяющие три внешние ветви многоугольника, присоединенные к четырем соседним узлам. В результате, кроме схемы смешанного соединения двухполюсников, образуются три независимых контура с одним током в каждом контуре и с одной или двумя добавочными неизвестными э. д. с. Расчет такой цепи можно произвести в три этапа. На каждом этапе необходимо строить семейства кривых.

В заключение отметим, что изложенную методику расчета можно распространить на соответствующие магнитные цепи.

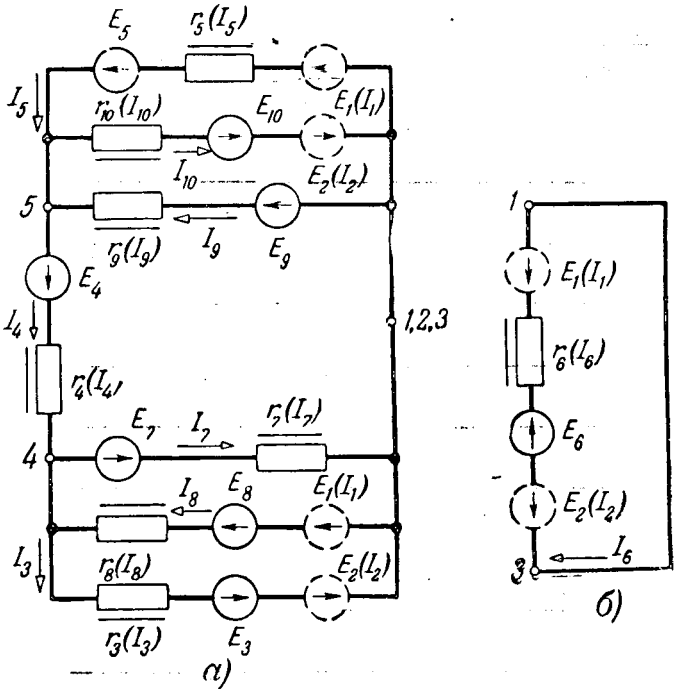


Рис. 6.

[1] Предлагаемый прием расчета произвольной цепи с четырьмя нелинейными элементами был доложен автором на семинаре по теории цепей кафедры ТОЭ МЭИ в январе 1954 г.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Приложение. Для иллюстрации изложенного способа расчета рассмотрим схему моста (рис. 3) постоянного тока с нелинейными элементами во всех шести ветвях. Электродвижущие силы ветвей заданы на рис. 3 в вольтах, а вольтамперные характеристики нелинейных элементов приведены на рис. 7. Для определения тока I воспользуемся схемой (рис. 4) в виде смешанного соединения активных нелинейных двухполюсников. На этой схеме ветвь с нелинейным элементом $r(I)$ и э. д. с. E представлена э. д. с. $E(I)$, включенной в первую и четвертую ветви.

Зададимся э. д. с. E, равной: —1; 0; 1; 2; 3 и 4 *в* и построим для этих значений э. д. с. семейства кривых $I_1(U_{ba})$ (рис. 8) и $I_4(U_{da})$ (рис. 9). На рис. 8 построены также характеристики $I_2(U_{ba})$ и $I_5(U_{db})$. В соответствии с уравнением $I_5 = I_2 - I_1$ произведем алгебраическое вычитание ординат кривых $I_2(U_{ba})$ и $I_1(U_{ba})$ при одинаковых значениях напряжения U_{ba} и для различных значений э. д. с. E, в результате получим семейство кривых $(I_2 - I_1)U_{ba}$. Затем в соответствии с уравнением $U_{da} = U_{db} + U_{ba}$, суммируя абсциссы кривых (рис. 8) $I_5(U_{db})$ и $(I_2 - I_1)U_{ba}$ для одних и тех же значений тока при указанных значениях э. д. с. E, получим семейство кривых $I_5(U_{db} + U_{ba})$. Для наглядности кривые этого семейства перенесены на другой чертеж (рис. 10).

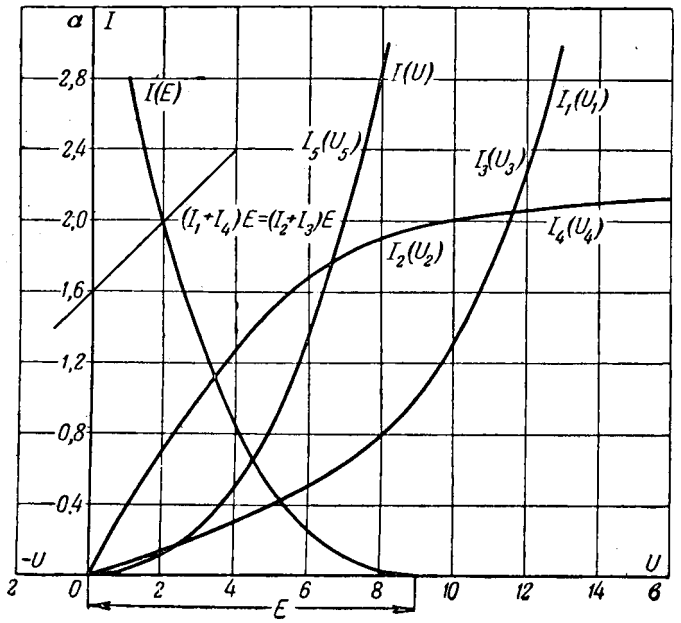


Рис. 7.

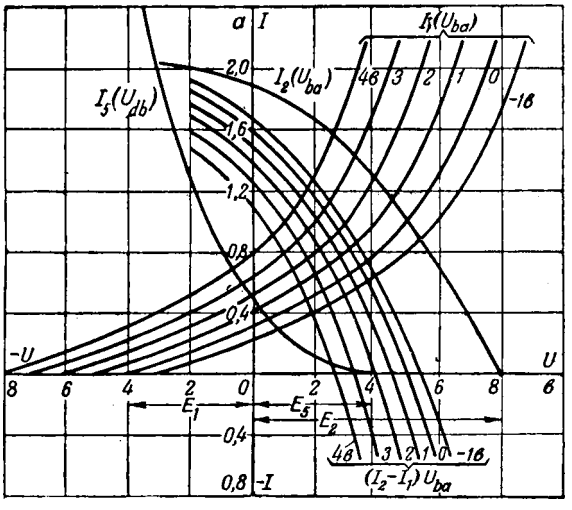


Рис. 8.

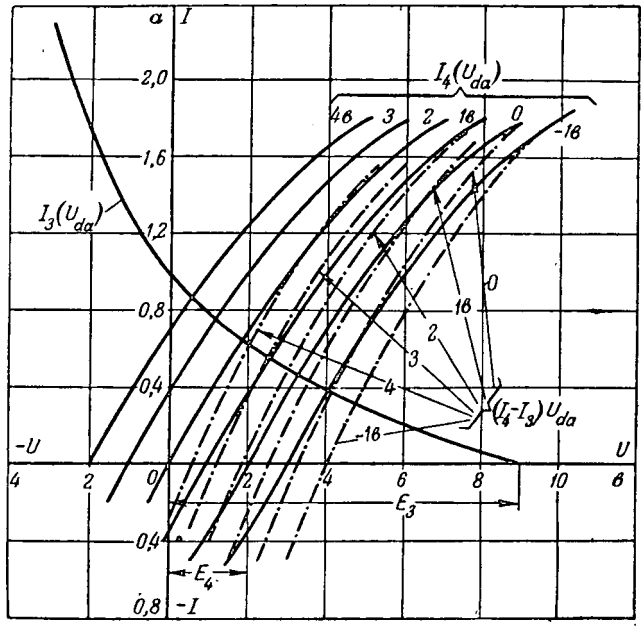


Рис. 9.

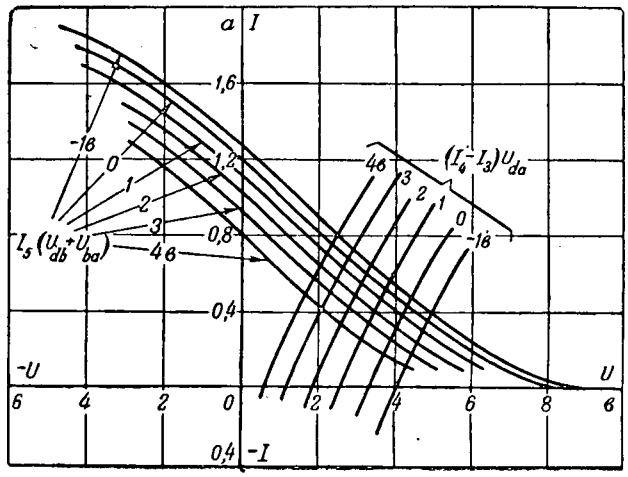


Рис. 10.

В соответствии с уравнением $I_5 = I_4 - I_3$ строим семейство кривых $(I_4 - I_3)U_{da}$ путем алгебраического вычитания ординат характеристик $I_4(U_{da})$ и $I_3(U_{da})$ для одинакового напряжения U_{da} и соответствующих значений э. д. с. E. Затем перенесем кривые $(I_4 - I_3)U_{da}$ этого семейства на рис. 10 и в соответствии с уравнением $U_{da} = U_{db} + U_{ba}$ найдем точки пересечения кривых $I_5(U_{db} + U_{ba})$ с кривыми $(I_4 - I_3)U_{da}$ при одинаковых значениях э. д. с. E. В результате получим значения тока I_5 и напряжения U_{da} для различных значений э. д. с. E. По известному напряжению U_{da} и характеристикам рис. 9 находим токи I_3 и I_4. Зная ток I_5, легко найдем, пользуясь характеристиками рис. 8, напряжение U_{ba}, а затем токи I_1 и I_2.

Результаты расчета представим в виде таблицы:

E, *в*	I_5, *а*	U_{da}, *в*	I_3, *а*	I_4, *а*	U_{ba}, *в*	I_1, *а*	I_2, *а*	I, *а*	
								I_1+I_4	I_2+I_3
—1,0	0,39	4,9	0,3	0,69	4,55	0,72	1,12	1,41	1,42
0,0	0,42	4,3	0,36	0,78	4,1	0,8	1,22	1,58	1,58
1,0	0,46	3,6	0,42	0,88	3,5	0,89	1,37	1,77	1,79
2,0	0,5	3,0	0,5	1,0	3,0	1,0	1,5	2,0	2,0
3,0	0,51	2,3	0,6	1,08	2,4	1,1	1,6	2,18	2,2
4,0	0,49	1,65	0,68	1,16	1,7	1,22	1,71	2,36	2,39

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

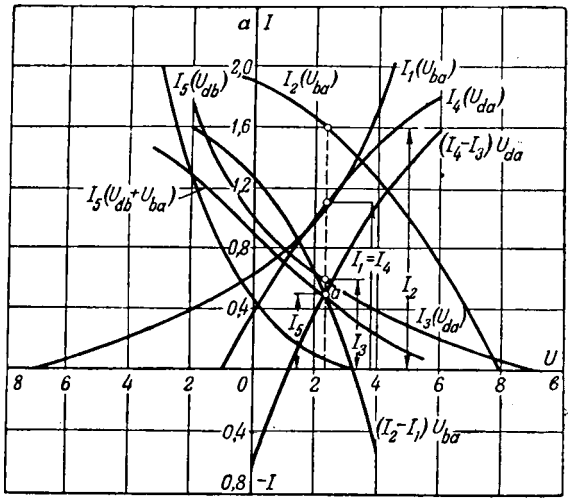


Рис. 11.

На основании данных этой таблицы на рис. 7 построим кривую $(I_1 + I_4)E = (I_2 + I_3)E$, точка пересечения которой с кривой $I(E)$ дает ток $I = 2$ *а* и напряжение $U_{ca} = 2$ *в*. Токи в остальных ветвях легко находятся по ранее построенным характеристикам.

Если в схеме рис. 3 отсутствует нелинейный элемент $r(I)$, то для расчета такой цепи необходимо принять в схеме рис. 4 э. д. с. $E(I) = E = \text{const}$. В этом случае отпадает необходимость в построении семейства характеристик для различных значений э. д. с. $E(I)$, так как эта э. д. с. имеет лишь одно заданное значение.

Пусть э. д. с. $E = 3$ *в*, а значения остальных э. д. с. и вольтамперные характеристики нелинейных элементов заданы такими же, как на схеме рис. 3. Для определения токов во всех ветвях заданной схемы предварительно построим (рис. 11) следующие вольтамперные характеристики двухполюсников: $I_1(U_{ba})$, $I_2(U_{ba})$, $I_3(U_{da})$, $I_4(U_{da})$ и $I_5(U_{db})$. Так как $I_5 = I_2 - I_1 = I_4 - I_3$, то для определения тока I_5 строим вспомогательные кривые $(I_2 - I_1)U_{ba}$ и $(I_4 - I_3)U_{da}$ соответственно при одинаковых значениях напряжений U_{ba} и U_{da}. Затем в соответствии с уравнением $U_{db} + U_{ba} = U_{da}$ суммируем абсциссы кривых $I_5(U_{db})$ и $(I_2 - I_1)U_{ba}$ для одних и тех же значений токов I_5 и $(I_2 - I_1)$, в результате получим кривую $I_5(U_{db} + U_{ba})$. Точка *а* пересечения этой кривой с кривой $(I_4 - I_3)U_{da}$ определяет ток $I_5 = 0{,}5$ *а* и напряжение $U_{da} = 2{,}3$ *в*. Из кривой $I_5(U_{db})$ следует, что при токе $I_5 = 0{,}5$ *а* напряжение $U_{db} = 0$, поэтому напряжение $U_{ba} = U_{da} = 2{,}3$ *в*. Этим напряжениям соответствуют (рис. 11) токи: $I_3 = 0{,}6$ *а*, $I_1 = I_4 = 1{,}1$ и $I_2 = 1{,}6$ *а*.

Литература

1. А. В. Нетушил. О применении принципа наложения при расчете нелинейных цепей. Электричество, № 8, 1950.

2. П. А. Ионкин. Применение эквивалентных схем активного четырехполюсника и шестиполюсника для расчета нелинейных цепей. Электричество, № 8, 1953.

3. П. А. Ионкин. О схемах замещения пассивных многополюсников. Электричество, № 11, 1950.

4. Н. А. Мельников и Б. А. Князевский. Аналогия в преобразованиях электрических схем с э. д. с и трансформациями. Сборник трудов ВЗЭИ, № 1, 1951.

[6.5.1955]

◇ ◇ ◇

Вольтамперные характеристики электрической дуги постоянного и переменного токов

Кандидат техн. наук П. В. СЕРГЕЕВ
Горно-металлургический научно-исследовательский институт Академии наук Казахской ССР

Для электрической дуги пока не предложено достаточно обоснованного математического выражения, позволяющего практически определить вольтамперные характеристики на основании небольшого числа исходных данных. Здесь сделана попытка получить простые обобщенные математические выражения вольтамперных характеристик дуги постоянного и переменного токов.

Статическая вольтамперная характеристика электрической дуги дана на рисунке.

Математическое выражение вольтамперной характеристики дуги было предложено рядом исследователей. Наибольшее распространение получила формула Айртон

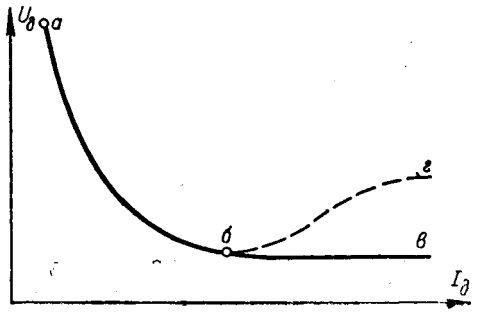
$$U_д = a + \beta l + \frac{\gamma + \delta l}{I_д}, \qquad (1)$$

где l — длина дуги, *мм*;
a — постоянная, равная приэлектродным падениям напряжения;
β, γ и δ — постоянные, зависящие от материала электродов и от газа, в котором горит дуга.

Формула Айртон — экспериментальная. Основные недостатки ее: большое число опытных коэффициентов, отсутствие учета зависимости характеристики от температуры окружающей среды. Кроме того, при любых значениях коэффициентов и токов она не дает поднимающегося участка характеристики (см. рисунок).

В 1928 г. С. И. Тельный предложил широко используемую в практике формулу [Л. 1]

$$U_д = a + (\beta - \sigma T) l, \qquad (2)$$



Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

где α и β — коэффициенты формулы Айртон;
T — температура пространства, окружающего дугу;
σ — температурный коэффициент.

Однако формула С. И. Тельного неприемлема для маломощных дуг.

Нам представляется, что при изучении вольтамперных характеристик электрических дуг целесообразно пользоваться аналогией между механизмом процесса переноса электрических зарядов между электродами дуги и между электродами электролизной ванны с кислым электролитом и нерастворимыми анодами.

Механизм переноса электрических зарядов между электродами в значительной мере предопределяется распределением потенциала между ними. При этом ясно, что одинаковый закон в распределении потенциала между электродами в разных случаях укажет на один и тот же состав энергетических затрат в общем энергетическом балансе переноса электрозаряженных частиц, иначе говоря, на одинаковый качественный состав компонентных напряжений в общем напряжении между электродами в каждом случае. Как известно, распределение потенциала между электродами электрической дуги и между электродами электролизера, например цинка, качественно носит совершенно одинаковый характер. Это указывает на известную общность в этих случаях механизма переноса электрических зарядов между электродами и на одинаковый состав компонентных напряжений в общем напряжении между электродами. Учитывая это, выведем уравнение вольтамперной характеристики для электролизной ванны и распространим его затем на дугу.

Для определения выражения вольтамперной характеристики электролизной ванны с нерастворимыми анодами и кислым водным раствором воспользуемся хорошо известным в электрохимии уравнением Тафеля для потенциала выделения водорода η или кислорода на электродах ванн:

$$\eta = a + b \cdot \lg q, \qquad (3)$$

где a и b — постоянные коэффициенты, зависящие от материала электродов и электролита;
q — плотность тока электродов, $a/м^2$.

Применяя при очень малой плотности тока электродов уравнение Тафеля к ванне, в которой анодом является свинец, катодом цинк и электролитом водный раствор серной кислоты, а также учитывая, что потенциалы выделения водорода или кислорода измерены относительно одного общего начала, получим:

$$u_в = \eta_a - (-\eta_к) = a_a + a_к + b_a \lg q_a + b_к \lg q_к . \qquad (4)$$

Индексы a и $к$ указывают на принадлежность той или иной величины к аноду или катоду.

Обозначив сумму постоянных коэффициентов $a_a + a_к$ через u_o, будем иметь:

$$U_в = u_o + b_a \lg q_a + b_к \lg q_к + I_в R_в , \qquad (5)$$

где $I_в R_в$ — активное падение напряжения в электролите.

При проверке на лабораторной ванне формула (5) дала отклонение опытных данных от расчетных не более 1,5%.

Выражение (5) будет структурно приемлемо и для выражения вольтамперной характеристики электрической дуги постоянного тока:

$$U_д = u_o + b_к \lg q_к + b_a \lg q_a + I_д R_д , \qquad (5а)$$

где u_o — теоретически наименьшее напряжение загорания дуги при бесконечно малой длине дуги и плотности тока электродов в 1 $a/м^2$, когда члены $b \lg q$ равны нулю;
q_a, $q_к$, $b_к$, b_a соответствуют обозначениям формулы (5);
$R_д$ — сопротивление дугового столба;
$I_д$ — ток дуги.

По аналогии с электролизными ваннами, составляющие напряжения $b_к \lg q_к$ и $b_a \lg q_a$ представляют собой поляризационные падения напряжения в приэлектродных слоях. Для данных электродов в электрических дугах средней и большой мощности плотности тока остаются практически неизменными при разных токах дуги, поэтому и составляющие приэлектродных падений напряжения в этих условиях также будут неизменными. Однако если диаметры электродов малы, а токи дуги велики, то возможны случаи горения дуги, когда плотности тока на электродах не остаются постоянными, а растут вместе с током. В этом случае за счет возрастания слагаемых $b \cdot \lg q$ возможно получить поднимающуюся вольтамперную характеристику дуги (см. рисунок).

С некоторым достаточным для практики приближением можно принять, что плотности тока электродов дуги при разных значениях тока остаются постоянными, тогда выражение вольтамперной характеристики дуги постоянного тока можно упрощенно записать так:

$$U_д = u'_o + I_д R_д , \qquad (5б)$$

где $u'_o = u_o + b_a \lg q_a + b_к \lg q_к$ — постоянный коэффициент, равный коэффициенту a формулы Айртон.

Как видно из (5б), при постоянном слагаемом u'_o характер вольтамперной характеристики определяется исключительно падением напряжения в дуговом столбе.

Для пользования полученной формулой (5б) найдем зависимость сопротивления дугового столба $R_д$ от тока дуги $I_д$. На участке $бв$ (см. рисунок), где характеристика практически па-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

раллельна оси абсцисс, сопротивление дуги изменяется строго обратно пропорционально току — по закону гиперболы. И для участка характеристики *бв* можно написать:

$$I_д \cdot R_д = U_д - u'_o = c, \text{ или } R_д = \frac{c}{I_д}. \quad (6)$$

На участке характеристики *ба* (см. рисунок) пропорциональность между сопротивлением и током нарушается. Для этого участка

$$R_д = k\frac{C}{I_д}. \quad (6а)$$

В формуле (6а) коэффициент k — некоторая функция тока. Выясним вид этой функции.

Казалось бы, что постепенно уменьшая до нуля ток дуги в формуле (6а), возможно получить непрерывно возрастающий до бесконечности ряд чисел, выражающих собой сопротивление дугового столба. Однако такое механическое использование формулы (6а) будет неверным, так так дуга не может гореть при бесконечно малых токах. Для каждой среды, в которой горит дуга, существует предельно минимальный ток i_o, при котором дуга может гореть; при токе ниже предельного дуга неминуемо погасает.

Минимальный ток горения дуги обеспечивает тот минимум энергии дугового столба $i_o^2 R_д$, который необходим для покрытия расходов энергии, связанных с тепловыми потерями дугового столба. Как явствует из самого определения, при заданной температуре окружающего воздуха эти потери энергии являются постоянными на единицу длины дуги, и поэтому ток i_o от длины дуги не зависит. Вообще же ток i_o является некоторой функцией температуры окружающей среды, при ее уменьшении ток i_o увеличивается. Для угольных электродов диаметром 6 *мм* при температуре окружающего воздуха около $+26°$ С ток $i_o = 4{,}6$ *а*, при температуре около $+7°$ С ток $i_o = 9$ *а*.

Электрическая дуга загорается не при любом минимальном токе, а только при превышении тока i_o. При приближении тока к этому значению i_o сопротивление дугового столба постепенно увеличивается, достигая бесконечности при токах, меньших i_o. Следовательно, точки кривой, близкие к току i_o, соответствуют гиперболической зависимости, так как при стремлении тока дуги именно к этому значению сопротивление дуги приближается к бесконечности. Учитывая, что характер кривой $R_д = f(I_д)$ как при больших токах, так и при малых приближается к гиперболическому, можно предположить, что вся кривая $R_д = f(I_д)$ есть гипербола вида:

$$R_д\ (I_д - i_o) = c. \quad (7)$$

Как видно из (7), при больших токах влияние тока i_o ничтожно. На основании (6а) и (7) получим:

$$R_д = \frac{c}{I_д} \cdot \frac{I_д}{I_д - i_o}, \quad (8)$$

откуда

$$k = \varphi(I_д) = \frac{I_д}{I_д - i_o}. \quad (9)$$

Легко показать, что для дуг различной длины l числитель формулы (8) можно представить в виде:

$$c = \beta l,$$

где β — коэффициент, аналогичный коэффициентам Тельного и Айртон.

С учетом сделанного замечания формула (8) окончательно примет вид:

$$R_д = \frac{\beta l}{I_д - i_o}. \quad (10)$$

Далее, найдем зависимость сопротивления дугового столба от температуры среды, окружающей дугу. Пусть имеются два случая горения дуги при одном и том же токе $I_д$, при одном расстоянии между электродами, но при разных температурах окружающей среды t_1 и t_2, которым соответствуют сопротивления дугового столба $R_{д1}$ и $R_{д2}$. В соответствии с формулой (10) отношение сопротивлений дугового столба будет:

$$\frac{R_{д1}}{R_{д2}} = \frac{\beta_1 (I_д - i_{o2})}{\beta_2 (I_д - i_{o1})}. \quad (11)$$

При известном $R_{д1}$

$$R_{д2} = R_{д1} \cdot \frac{\beta_2 (I_д - i_{o1})}{\beta_1 (I_д - i_{o2})}. \quad (11а)$$

Отношение $\frac{\beta_2}{\beta_1}$, отличающееся от единицы, является функцией разностей температур сред, окружающих дуги, поэтому можно написать:

$$\frac{\beta_2}{\beta_1} = 1 - \sigma t, \quad (12)$$

где σ — температурный коэффициент сопротивления дугового столба;

t — разность температур сред, окружающих дугу.

С учетом выражения (12) формула (11а) будет иметь вид:

$$R_{д2} = R_{д1} \cdot \frac{I_д - i_{o1}}{I_д - i_{o2}} \cdot (1 - \sigma t). \quad (13)$$

Выражение (13) является общим. Для средних и мощных дуг, когда $I_д \gg i_o$, оно получит вид:

$$R_{д2} = R_{д1}(1 - \sigma t) = \frac{\beta_1 l}{I_д} \cdot (1 - \sigma t). \quad (13а)$$

Как легко видеть, формула (13а), являющаяся частным случаем формулы (13), целиком соответствует второму слагаемому формулы (2) С. И. Тельного [Л. 1]. То, что из общей формулы автоматически получаются частные апробированные практикой решения, подтверждает правильность общей формулы.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

С учетом (10) для данной температуры упрощенная вольтамперная характеристика дуги (5б) примет вид:

$$U_д = u_o' + \beta l \cdot \frac{I_д}{I_д - i_o}. \qquad (14)$$

Полученное выражение (14) для вольтамперной характеристики дуги является достаточно физически обоснованным, оно справедливо для всех диапазонов тока, легко учитывает влияние температуры и имеет меньшее число коэффициентов, чем формула Айртон. Точность, даваемая формулой (14), выше чем формулы Айртон, так как она учитывает температурный фактор и другие особенности горения дуги.

Далее, пренебрегая в мощных дугах током i_o, который в этих условиях составляет доли процента от тока дуги, можно формуле (14) придать вид:

$$U_д = u_o' + \beta l. \qquad (14а)$$

Как нетрудно видеть, выражение (14а) целиком соответствует формуле С. И. Тельного.

В табл. 1 сопоставляется формула (14) (без учета температуры) с формулой Айртон для случая горения дуги между угольными электродами в воздухе. В этом случае коэффициенты формулы Айртон будут иметь значения: $a = 38$; $\beta = 1{,}8$; $\gamma = 19$; $\delta = 12{,}6$.

Таблица 1

Ток дуги, *а*	По формуле Айртон		По формуле (14)	
	Напряжение дуги, *в*	Сопротивление дугового столба, *ом*	Напряжение дуги, *в*	Сопротивление дугового столба, *ом*
Длина дуги 10 *мм*				
10	70,5	3,25	70,5	3,25
50	59	0,4	57,7	0,395
100	57,45	0,195	56,8	0,189
1 000	56	0,018	56	0,018
Длина дуги 100 *мм*				
10	345	30,8	363	32,5
50	243,6	4,1	235,5	3,95
100	230,8	1,928	227	1,89
1 000	219,3	0,181	218	0,18

Примечание. Коэффициент i_o формулы (14) определялся по формуле (10) при известных коэффициентах формулы Айртон и значению сопротивления дуги при токе 10 *а*:

$$i_o = \frac{32{,}5 - 18}{3{,}25} = 4{,}5 \text{ а}.$$

Как видно из табл. 1, расхождения значений, подсчитанных по обеим формулам, не превышают 3 ... 4%.

Формула (14) проверялась также и экспериментально на дуге постоянного тока длиной 2 *мм*, горящей при температуре окружающего воздуха 25 ... 26° С между вертикальными угольными электродами диаметром 6 *мм*. Результаты испытаний дуги и результаты расчетов по предложенной формуле и формуле Айртон приведены в табл. 2.

Таблица 2

Ток дуги, *а*		4,6	5	5,6	8,0	21	35
Напряжение дуги, *в*	Опыт	Не горит	80	—	—	40	40
	По формуле авторэ	Не горит	83	63,5	46,5	42,6	42,1
	По формуле Айртон	51,2	50,4	49,6	47,1	43,7	42,8

Как видно из табл. 2, сходимость опытных данных с расчетными по предлагаемой формуле значительно выше, чем по формуле Айртон.

Расхождения особенно ощутительны при токах, близких к минимальным токам горения дуги.

При постоянном токе коэффициенты U_o' и β в формуле (14) равны соответствующим коэффициентам формулы Айртон. Поэтому, зная коэффициенты a и β формулы Айртон, а также одну точку характеристики дуги, удаленную от тока i_o, легко расчетным путем определить коэффициент i_o.

Полученные выражения (14) и (14а) вольтамперных характеристик для дуг постоянного тока справедливы и для действующих значений тока и напряжения дуг переменного тока, объясняется это тем, что использование в выражениях вольтамперной характеристики действующих значений делает идентичным по тепловому режиму случаи постоянного и переменного токов [Л. 2 и 3]. Справедливость этого экспериментально доказана в работе С. И. Хитрика и Н. М. Чуйко [Л. 4], которые для мощной печной дуги переменного тока и в разных режимах работы печей показали полную возможность применения выражения, аналогичного (14а). Однако слагаемые a или U_o' получились на переменном токе значительно меньше, чем на постоянном. Это целиком находит свое объяснение в способах измерения. Действительно, если на постоянном токе слагаемое a формулы Айртон или U_o' формулы (14) можно трактовать как приэлектродные падения напряжения, то на переменном токе это будут только соответственно действующие значения этих величин.

Выводы. 1. Получены теоретически и экспериментально обоснованные выражения для вольтамперных характеристик электрической дуги.

2. Дана методика учета сопротивления дугового столба в зависимости от температуры окружающей среды.

Литература

1. С. И. Тельный. Некоторые вопросы теории дуговой электрической печи. Электричество, № 2, 1947.

2. Ф. Кессельринг. Теоретические основы расчета коммутационных аппаратов. Госэнергоиздат, 1949.

3. Г. А. Сисоян. Электрическая дуга в руднотермической печи. Академия наук Арм. ССР, Ереван, 1954.

4. С. И. Хитрик и Н. М. Чуйко. Зависимость между напряжением и длиной дуги переменного тока. ДОМЕЗ, № 10, 1935.

[5.3.1956]

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Гашение электрической дуги постоянного тока во вращающемся магнитном поле

Доктор техн. наук, проф. А. Е. КАПЛЯНСКИЙ,
кандидат техн. наук, доц. Л. С. ПОЛОТОВСКИЙ,
инж. Н. Ф. СОКОЛОВ и кандидат техн. наук
П. И. ПЕТРОВ

Ленинград

Общеизвестно, что гашение дуги постоянным магнитным полем сводится к удлинению дуги и охлаждению ее встречным потоком воздуха. Представляет интерес проверка возможности гашения дуги вращающимся магнитным полем. Оно может быть осуществлено во внутренней полости возбужденного статора двухполюсного асинхронного двигателя, из которого удален ротор, а электроды дуги расположены по оси статора.

Движение электрической дуги во вращающемся магнитном поле не поддается аналитическому расчету. Поэтому для качественного определения влияния вращающегося магнитного поля на горящую дугу был проделан следующий опыт. Два прямых электрода K были помещены вдоль оси статора асинхронного двигателя (рис. 1) и к ним

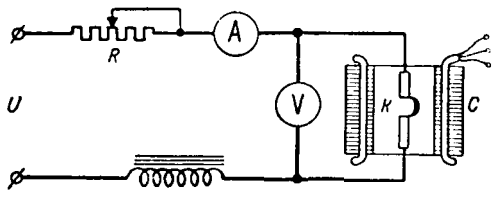


Рис. 1. Принципиальная схема для исследования поведения и гашения электрической дуги постоянного тока во вращающемся магнитном поле.

подводилось напряжение 120 *в* постоянного тока через реостат R и индуктивность L. Дуга зажигалась при выключенном статоре (отсутствии вращающегося поля), затем включалось вращающееся поле (3 000 *об/мин*), сначала слабое, не гасящее дугу, затем оно увеличивалось по напряженности до наступления погасания дуги. При включении поля ток цепи I резко уменьшался, а напряжение на дуге $U_д$ возрастало. К сожалению, низкое напряжение источника не позволило поддерживать неизменным ток и опыт выполнялся при постоянстве напряжения источника и предвключенных сопротивлений. В этих условиях за величину, характеризующую влияние вращающегося поля на электрическую дугу, в первом приближении можно принять сопротивление дуги $r = \frac{U_д}{I}$. Результаты опыта представлены на рис. 2, где по оси ординат отложено отношение сопротивления дуги r при включенном вращающемся поле к сопротивлению дуги при отсутствии поля r_0, а по оси абсцисс дана максимальная индукция B_m вращающегося поля. На кривых указано значение тока дуги до включения вращающегося магнитного поля. Из кривых следует, что влияние вращающегося магнитного поля на электрическую дугу увеличивается с ростом тока дуги.

Первая часть исследования [1] гашения электрической дуги вращающимся магнитным полем была проведена в лаборатории завода «Электроаппарат» по схеме рис. 1 при напряжении источника постоянного тока 220 *в* и токах до 200 *а*. В размыкаемой цепи находилась индуктивность $L = 0{,}18$ *гн*. Осциллографировались ток и напряжение дуги, ток и напряжение статора и перемещение подвижного контакта. Процесс гашения дуги исследовался при скорости вращающегося поля 3 000 *об/мин*, максимальной индукции вращающегося поля 125 ... 1 250 *гс* и расхождении контактов 1,6 ... 20 *мм*.

Осциллограммы показали, что при малой индукции ($B_m = 440$ *гс*) дуга гаснет одновременно с полным расхождением контактов или

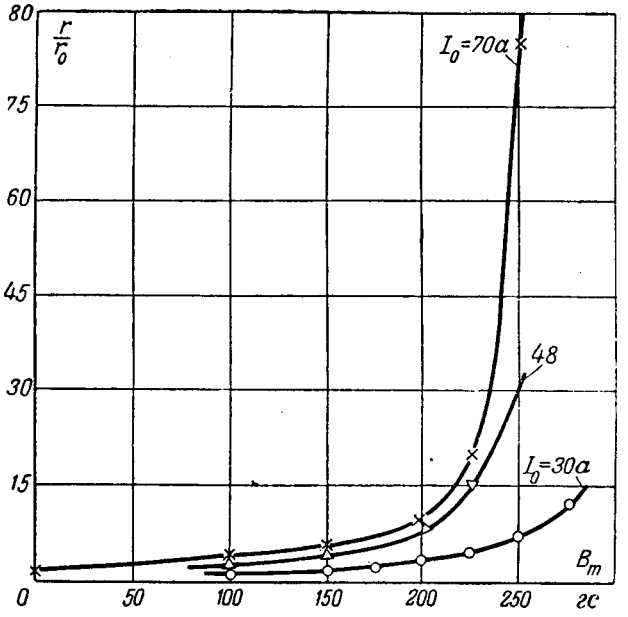


Рис. 2. Зависимость $\frac{r}{r_0}$ от B_m.

даже несколько позже; при индукции $B_m = 1\,250$ *гс* дуга гаснет еще до полного расхождения контактов, даже при их относительно медленном движении.

На основании многочисленных осциллограмм на рис. 3 построены зависимости, каждая точка которых получена как средняя из ряда опытов. Гиперболического вида зависимость времени гашения дуги от максимальной индукции $t_д = f(B_m)$ представлена для хода контактов $l = 14$ *мм*. При большем ходе контактов кривая расположится ниже, при меньшем—выше.

Время гашения дуги в зависимости от расхождения контактов $t_д = f(l)$ представлено для

[1] Эту серию опытов провел инж. Е. П. Шевцов.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

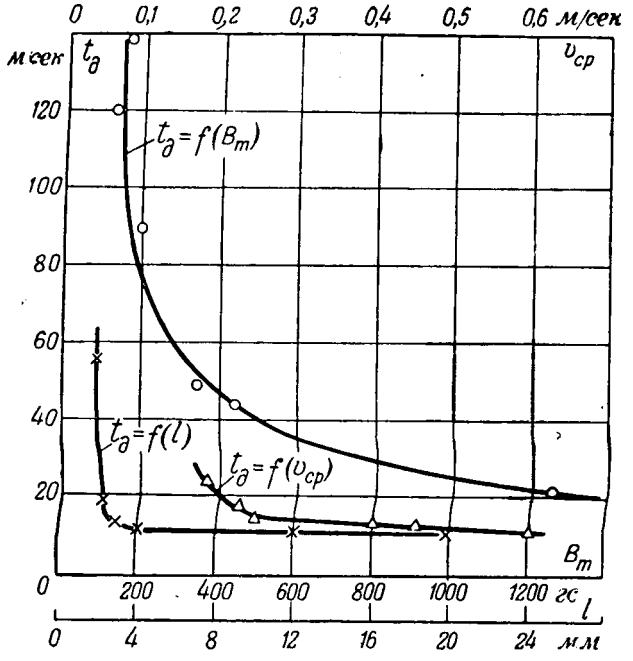


Рис. 3. Время гашения дуги $t_д$ в зависимости от индукции B_m, хода контактов l и средней скорости гашения $v_{ср}$.

максимальной индукции $B_m = 1\,250$ *гс*. Из этой кривой видно, что, начиная с $l = 4$ и до $l = 20$ *мм*, время гашения не зависит от расстояния между контактами, так как гашение происходит еще во время их движения. Таким образом, для данных условий опыта, в том числе средней скорости расхождения контактов 0,2 ... 1,0 *м/сек*, оптимальное расхождение контактов составляет 4 ... 6 *мм*.

Время гашения в зависимости от средней скорости расхождения контактов $t_д = f(v_{ср})$ представлено для $B_m = 1\,250$ *гс*. Из этой кривой видно, что скорость расхождения контактов более 1 *м/сек* дает лишь незначительное уменьшение времени гашения дуги. Перенапряжения, возникавшие на контактах при гашении дуги, были тем больше, чем выше была максимальная индукция вращающегося поля, но не превышала 1 500 *в*.

Для выяснения влияния объема, в котором происходит гашение дуги, на скорость ее гашения были произведены опыты по размыканию той же цепи постоянного тока, но внутрь статора с внутренним диаметром 126 *мм* вставлялась фарфоровая трубка с внутренним диаметром 48 *мм*. Опыты были проведены при разрываемом токе 195 *а*, напряжении источника 240 *в*, максимальной индукции вращающегося поля 440 *гс* и расхождении контактов 3 ... 20 *мм*. Оказалось, что уменьшение объема в $\left(\frac{126}{48}\right)^2 \approx 7$ раз влечет за собой увеличение времени гашения не более чем в 1,7 раза.

Проверка гашения дуги постоянного тока при более высоких напряжениях и бо́льших токах была проведена на одной из подстанций Лентрамвая при напряжении 600 *в* и токах до 850 *а*. Испытания производились по схеме рис. 1. Индуктивностью в цепи служила первичная обмотка сварочного трансформатора СТ-2, расхождение контактов в этих опытах составляло $l = 7$ *мм*.

На рис. 4 приведены некоторые из полученных осциллограмм. Так как источником тока служил ртутный выпрямитель, то на всех кривых видны наводки от переменной составляющей выпрямленного тока с частотой 300 *гц*. Ход контактов не осциллографировался. При этих испытаниях время гашения дуги не превышало 2 *мсек*. С увеличением разрываемого тока время гашения падало (рис. 5).

В дальнейшем была проверена возможность гашения дуги постоянного тока вращающимся магнитным полем при более высоком постоянном напряжении. Опыты по схеме рис. 1 проводились на тяговой подстанции Ленинградской железной дороги во время ночного прекращения движения электропоездов, когда напряжение на подстанции достигало при холостом ходе 2 000 *в*, а при нагрузке снижалось до 1 900 ... 1 800 *в*. При опытах в качестве индуктивности в цепи дуги была использована разделительная катушка ртутного выпрямителя. Средняя скорость расхождения контактов не превышала 0,5 *м/сек* при расхождении контактов 25 *мм*. Повидимому, столь малая скорость расхождения контактов была недостаточной при таком напряжении. Поэтому при максимальной индукции вращающегося магнитного поля 1 250 *гс* удавалось производить размыкание лишь

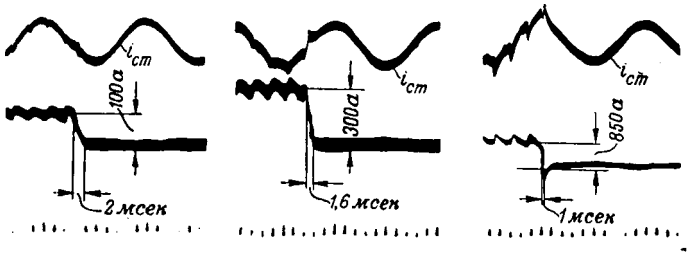


Рис. 4. Осциллограммы гашения дуги при $U = 600$ *в*, $l = 7$ *мм* и $B_m = 1\,250$ *гс*.

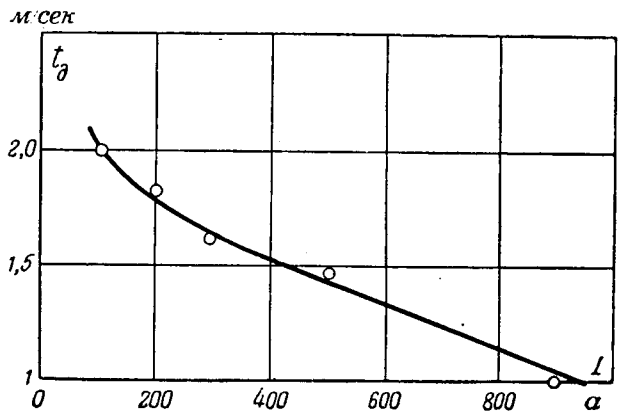


Рис. 5. Время гашения $t_д$ в зависимости от значения разрываемого тока I при $B_m = 1\,250$ *гс*.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

при токах до 400 *а*. Время гашения дуги не превышало 40 *мсек*. Во избежание попадания дуги на обмотку статора, высота которого была 160 *мм*, внутрь статора вставлялась асбоцементная труба с внутренним диаметром 120 и высотой 200 *мм*. Таким образом, гашение дуги производилось в весьма малом объеме внутренней полости трубы.

Интересно отметить, что, несмотря на длительно горевшую дугу, при многократных нагрузках свыше 700 *а*, когда выключение производилось станционным автоматом, поверхность электродов оставалась совершенно чистой, без всяких наплывов и расплавлений, наблюдающихся обычно на станционных автоматах с гораздо более мощными контактами.

Для проверки влияния на гашение дуги скорости вращения магнитного поля были произведены опыты, в которых статор питался токами различной частоты, начиная с постоянного тока до тока частоты 400 *гц*. Опыты производились при малых токах (до 120 *а*) и напряжениях (до 110 *в*) по схеме рис. 1 при неизменном значении максимальной индукции вращающегося поля 440 *гс*; индуктивность цепи составляла 0,25 *гн*. В качестве контактов использовались медные прутки диаметром 8 *мм*, расположенные внутри статора малой высоты (100 *мм*); расхождение контактов составляло 4 *мм*. Одновременно с осциллографированием производилась киносъемка со скоростью до 4 000 кадров в секунду Киноаппарат был расположен под углом около 25° по отношению к оси электродов.

При индукции $B_m = 440$ *гс* в интервале частот от нуля до 50 *гц* время гашения оставалось почти постоянным, затем оно росло с частотой, увеличившись примерно в 5 раз при 400 *гц*.

На рис. 6 представлены осциллограммы гашения дуги магнитным полем, вращающимся со скоростями, соответствующими частотам 25, 50 и 400 *гц*, а также для случая пульсирующего поля частотой в 50 *гц*. Киносъемка дуги показала, что дуга следует за вращающимся полем с некоторым скольжением и чем больше скорость вращения поля, тем сильнее расплывается ствол дуги при своем вращении.

На рис. 7 приведен один из фильмов киносъемки гашения дуги полем, вращающимся с частотой 50 *гц*. Скорость фильма составляла 4 000 кадров в секунду. За время гашения дуги (6 *мсек*) магнитное поле повернулось на $\frac{t_д}{T} 2\pi = \frac{6}{20} 2\pi = 0{,}6\pi$, на 108°; дуга же повернулась на 70...75°. Время гашения дуги при пульсирующем поле почти в 1,5 раза больше, чем при вращающемся поле (10 *мсек* вместо 6...7 *мсек*). Дуга вытягивается в одном направлении и имеет бо́льшую интенсивность по сравнению с дугой при вращающемся поле.

Кроме описанных опытов, было проведено исследование эффективности гашения электрической дуги постоянного тока вращающимся магнитным полем в том случае, когда контакты, между которыми возникает электрическая дуга,

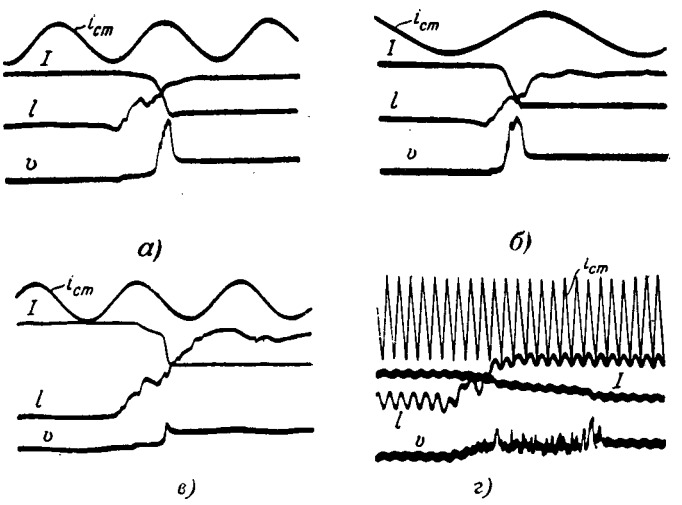


Рис. 6. Осциллограммы гашения дуги при $U = 110$ *в*, $I = 120$ *а* и $B_m = 440$ *гс*; υ — напряжение на контактах. *а* — пульсирующее магнитное поле, $f = 50$ *гц*; *б*, *в* и *г* — вращающиеся магнитные поля частоты 25, 50 и 400 *гц*.

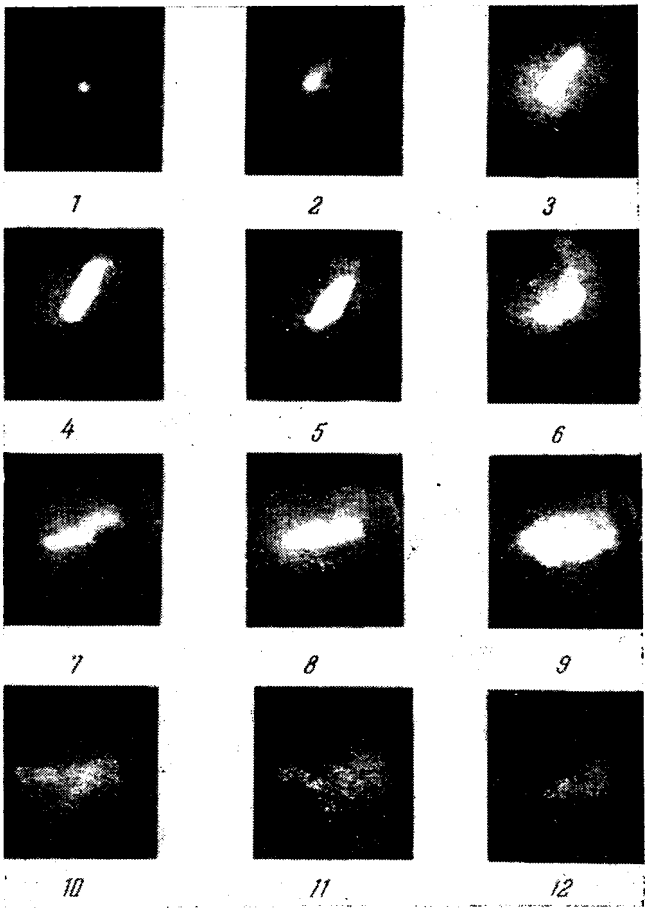


Рис. 7. Поведение электрической дуги во вращающемся магнитном поле частоты $f = 50$ *гц* (скорость фильма 4 000 кадров в секунду; кадры приведены через один).

располагались не в центре статора, а в зазоре, образованном статором асинхронного двигателя с неподвижным стальным сердечником. Эффективность действия поля определялась как при продольном, так и при тангенциальном размыканиях контактов.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Осциллограммы показали, что при продольном размыкании контактов и скорости размыкания $v = 2$ *м/сек* время гашения дуги для различных расстояний между контактами $l = 2 \ldots 16$ *мм* составляет $t_д = 4 \ldots 5$ *мсек*, при тангенциальном размыкании $t_д = 7 \ldots 15$ *мсек*. Гашение электрической дуги в обоих случаях происходило достаточно надежно. Эти опыты проводились при токе до 120 *а* и напряжении 120 *в*.

В заключение приведем результаты опытов, проведенных с целью проверки возможности применения вращающегося магнитного поля для гашения дуги в ионном вентиле. Опыты производились с простой стеклянной трубкой с ртутным катодом, имевшей один дежурный анод. Вращающееся магнитное поле гасило дугу основного анода, несмотря на то, что вспомогательных электродов для отвода ионного тока, отклоненного магнитным полем от основного анода, не было. При включении слабого вращающегося магнитного поля, не вызывавшего полного прекращения тока через вентиль, в верхней части трубки у стенок наблюдалось интенсивное свечение, тогда как у анода свечение почти пропадало. Очевидно, что введение в трубку кольцевого металлического электрода с малым положительным потенциалом относительно катода улучшило бы эффект управления током основного анода. Опыты производились при анодных токах до 10 *а*. Снятые осциллограммы показали, что время гашения дуги составляло около 2 *мсек*.

Выводы. Описанные эксперименты показывают, что гашение дуги вращающимся магнитным полем при промышленной частоте в ряде случаев более эффективно, а в остальных — не менее, чем гашение постоянным и пульсирующим полем. Питание дугогасящих устройств трехфазным током не представляет затруднений, так как обычно постоянный ток получается в результате выпрямления трехфазного тока. В ряде случаев осуществление этого способа приведет к меньшим габаритам дугогасящих устройств и позволит применить его в выключающей аппаратуре, ионных приборах и контактных выпрямителях.

Авторы испытали макет трехфазного механического выпрямителя, контакты которого были помещены во вращающееся магнитное поле. Без поля появляется сильное искрение на контактах уже при токе 0,5 *а* и напряжении 30 *в*. При включении поля видимое искрение на контактах отсутствовало вплоть до возможной в условиях лаборатории нагрузки на стороне постоянного тока 150 *а*. Необходимое значение индукции вращающегося магнитного поля лежит в пределах 360 ... 500 *гс*.

Авторы приносят глубокую благодарность инженерно-техническому персоналу предприятий, где ставились опыты, за содействие и помощь при проведении этих опытов. Авторы также выражают признательность проф. О. Б. Брону за ряд ценных советов.

[18.1.1955]

◇ ◇ ◇

Испытания и эксплуатация ионного возбудителя турбогенератора 3000 *квт*

Инж. Ю. А. ШМАЙН

Центральная научно-исследовательская электротехническая лаборатория Министерства электростанций

В 1951 г. на тэц № 7 Мосэнерго был смонтирован разработанный ЦНИЭЛ экспериментальный ионный возбудитель для турбогенератора 3 000 *квт* *. Фактически это была первая в Советском Союзе промышленная установка ионного возбуждения. При разработке установки ставилась задача определения влияния пульсаций тока возбуждения на нагрев ротора и на характеристики генератора, а также предполагалось проверить в эксплуатационных условиях поведение вентилей, схемы управления и вспомогательного оборудования. В связи с такой постановкой была принята наиболее простая схема возбудителя (рис. 1) с питанием выпрямительного трансформатора от шин 6,6 *кв* при трехфазной однотактной схеме выпрямления [1]. Максимальная кратность форсировки была принята равной трем.

В ионном возбудителе желательно было использовать безнасосные (запаянные) выпрямители, что заметно упрощает схему и уход за возбудителем. Вначале испытывались игнитроны типов И-100/1000 и И-100/5000, затем — игнитроны, разработанные ВЭИ. Для наладки и различных испытаний возбудителя была смонтирована активно-индуктивная схема замещения ротора генератора, в которой в качестве индуктивности использовался заторможенный асинхронный двигатель.

Схема управления. Испытывались схемы зависимого и независимого поджигания. В схеме зависимого поджигания поджигатель подключался через тиратрон и ограничительное сопротивление непосредственно к аноду игнитрона. Во второй схеме использовался разряд конденсатора либо непосредственно на поджигатель, либо через промежуточный разделительный трансформатор (рис. 2).

Тиратроны управлялись от электромагнитной стабилизированной пик-схемы. Схема содержала феррорезонансный стабилизатор напряжения

* В разработке возбудителя приняли участие инж. С. Х. Харламов в техник В. М. Яковлев (ЦНИЭЛ); в монтаже и пробной эксплуатации возбудителя участвовали: начальник электроцеха тэц А. К. Грибков, заведующий электролабораторией К. Г. Ярина и дежурный персонал тэц.

[1] По предложению ЭНИН АН СССР к схеме был добавлен буферный вентиль.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

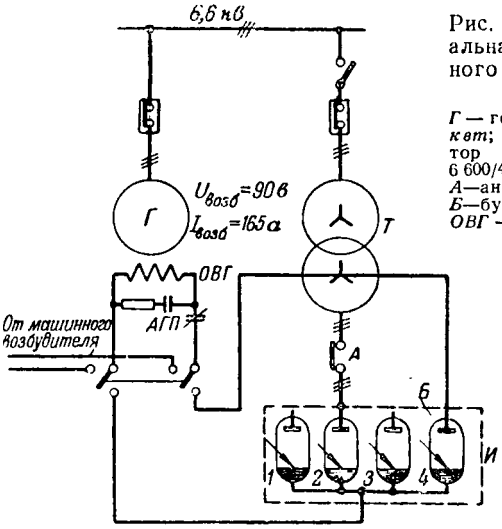


Рис. 1. Принципиальная схема ионного возбудителя ЦНИЭЛ

Г — генератор 3 000 *квт*; *Т*—трансформатор возбудителя 6 600/400 *в*, 100 *ква*; *А*—анодный автомат; *Б*—буферный вентиль; *ОВГ* — обмотка возбуждения генератора; *И* — игнитроны.

($Д_1$, *С*), дроссель и пик-трансформатор *ТП*. Дроссель был выбран так, чтобы ток в цепи пик трансформатора имел форму, близкую к треугольной. Изменением подмагничивания пик-трансформатора (обмотки *ОП*, рис. 2) осуществлялось смещение пика в пределах 130 ... 140° электрических. Схема допускает снижение напряжения питания на 50 ... 60%, требует для управления мощности около 5 ... 6 *вт* и обладает высоким быстродействием: время, необходимое для изменения в полном диапазоне угла выхода пика напряжения, не превышает 0,02 *сек*, что соответствует постоянной времени менее 0,007 *сек*. Дроссели и пик-трансформаторы выполнены на стандартных штампах трансформаторной стали.

Ручное регулирование тока подмагничивания пик-трансформаторов выполнялось при помощи потенциометра с серводвигателем. Были также установлены счетчик пропусков зажигания и реле, действующее на сигнал при выходе из строя одного из вентилей.

После предварительных испытаний возбудитель был усовершенствован и в схему выпрямления был введен буферный (нулевой) вентиль. Буферный вентиль резко повышает надежность, позволяя при выходе из строя одного из основных вентилей не только поддержать номинальный ток возбуждения, но и при необходимости достигать форсировки возбуждения с кратностью около двух.

Исследования в ЦНИЭЛ показали, что в случае игнитронов целесообразно включать буферный вентиль только в аварийных режимах, при выходе из строя одного из основных вентилей.

Для обеспечения автоматического включения буферного вентиля были разработаны специальные схемы: одна — релейная, другая — с использованием магнитных усилителей, работающих в режиме реле. Принцип работы этих схем состоит в следующем: измерительный орган (токовое реле или магнитный усилитель) включается через фильтр *LC*, настроенный на частоту 50 *гц*, на напряжение возбуждения генератора. При нормальной работе основная гармоника напряжения возбуждения имеет частоту 150 *гц*. При выходе из строя одного из вентилей появляется частота 50 *гц*, реле или усилитель срабатывает и подает «плюс» на сетку тиратрона поджигания буферного вентиля и на счетчик пропусков. С некоторой выдержкой времени дается сигнал на щит управления о неисправности одного из вентилей. Следует отметить, что такие схемы можно с успехом использовать в любых выпрямительных устройствах для сигнализации о повреждении одного из вентилей.

Конструктивно возбудитель оформлен в виде двух шкафов: в одном находится схема управления, в другом — игнитроны. Конструкция каждого шкафа — ячеечная, и ревизию, испытание или смену какого-либо элемента возбудителя можно производить во время его работы, обесточив только одну фазу, что влечет за собой автоматическое включение буферного вентиля.

Испытание. Для определения влияния пульсаций тока возбуждения на нагрев ротора были проведены тепловые испытания генератора в неподвижном его состоянии и при вращении ротора.

При неподвижном генераторе с целью обнаружения возможных местных нагревов в различных частях ротора были установлены термопары, а обмотку возбуждения нагрузили током 50 *а* от ионного возбудителя. За 2 часа испытаний наибольший наблюдавшийся перегрев составлял около 3,6° С (носик бандажа); местных нагревов обнаружено не было.

Тепловые испытания на вращающемся генераторе производились при работе генератора параллельно с сетью. Сравнительные испытания с машинным и ионным возбудителями показали, что ионный возбудитель не вызывает какого-либо дополнительного нагрева. Не было также обнаружено различия в характеристиках холостого хода и короткого замыкания генератора.

Опыты форсировки возбуждения и гашения поля показали высокое быстродействие возбудителя. Например, при инверторном гашении поля через 0,6 *сек* после форсировки возбуждения (ток ротора 320 *а*) ток ротора был равен нулю.

Одним из существенных вопросов, определяющих надежность работы игнитронов, является вопрос выбора схемы зажигания.

Как уже указывалось, испытывались различные схемы поджигания. Вначале испытывалась схема независимого поджигания без промежуточного разделительного трансформатора (C = = 4 *мкф*; R_2 = 2,5 *ом*, тиратрон ТГ-15/2000;

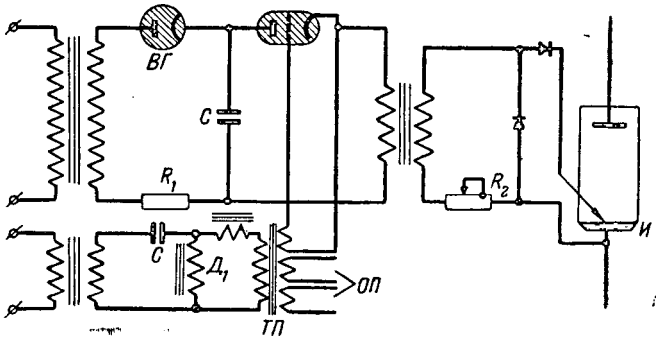


Рис. 2. Независимая схема поджигания с разделительным трансформатором.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

$U = 430$ *в*). Испытания показали, что уже после 400 ... 500 *час* работы тиратроны работают недостаточно удовлетворительно вследствие потери эмиссионной способности катода, что в свою очередь вызывалось слишком большой амплитудой тока (до 70 *а*) в момент, следующий за образованием катодного пятна. Тогда параметры схемы были изменены таким образом, чтобы по возможности уменьшить амплитуду тока через тиратрон: напряжение было увеличено до 900 *в*, а сопротивление R_2 до 25 *ом*; были также применены тиратроны другого типа — ТР-20/15000 (ТР1-6/15). Однако и при этой схеме срок службы тиратронов оказался низким (около 2 000 *час*), что было связано с принципиальным недостатком указанных схем зажигания, заключающимся в том, что после образования катодного пятна ток через тиратрон резко возрастал.

Испытания зависимых схем поджигания показали непригодность также и этих схем для целей ионного возбуждения в силу ряда присущих им органических недостатков.

Для определения оптимальных параметров импульса поджигания было проведено исследование характеристик поджигателей отечественных игнитронов различных типов в самых разнообразных режимах работы. Эти исследования позволили разработать схему поджигания с разделительным трансформатором (рис. 2) и определить методику расчета элементов такой схемы [Л. 1]. Испытания показали, что в схеме рис. 2 срок службы тиратронов резко увеличился. Например, схема, смонтированная в лаборатории, проработала более 11 000 *час*. В установке на тэц некоторые тиратроны работают также уже более 8 000 *час*.

Первые испытания возбудителя показали, что игнитроны типа И-100/1000 давали частые обратные зажигания (с интервалом от нескольких минут до нескольких десятков часов), хотя максимальный скачок обратного напряжения не превышал 600 *в*. Расчет процесса обратного зажигания показал, что в возбудителе на тэц ток обратного зажигания проходит через нуль за время, меньшее одного периода. Дальнейшие эксперименты показали, что время, остающееся до начала следующего периода, достаточно для деионизации и восстановления вентильной прочности игнитрона, давшего обратное зажигание.

Для проверки возможности использования этого явления было осуществлено замедление действия анодных автоматов путем увеличения момента инерции отключающего механизма (время отключения 0,09 *сек* при токе 1 000 *а*). Уставку автомата по току срабатывания не изменяли. Результаты оказались чрезвычайно благоприятными. После замедления действия автоматов из 120 обратных зажиганий 118 не вызвали отключения, т. е. они самоликвидировались. Тем не менее вентильная прочность игнитронов типа И-100/1000 оказалась недостаточной. Игнитроны типа И-100/5000 обратных зажиганий не давали, однако срок службы их был совершенно недостаточным (не более 1 700 *час*). Основными причинами выхода вентилей из строя были потеря вакуума и разрушение поджигателей (вентили выпуска 1952 г. завода «Светлана»).

В 1955 г. в возбудитель были установлены игнитроны, разработанные ВЭИ. Вентили оказались достаточно надежными. Возбудитель с игнитронами был включен в эксплуатацию в мае 1955 г.**; по 18 декабря 1955 г. общее время работы возбудителя составило 3 550 *час*. За это время имели место 17 отключений генератора по графику станции. Максимальное время непрерывной работы возбудителя составило 679 *час*.

За указанный период имели место два отключения возбудителя из-за неполадок в его работе. Первое отключение произвел персонал станции при появившихся колебаниях тока возбуждения, вызванных плохим контактом в цепи накала тиратрона. Следует заметить, что в отключении не было надобности, так как замену ламп можно делать, не отключая возбудителя и не снижая тока возбуждения. Второе отключение было вызвано прекращением подачи воды в пожарную магистраль станции, от которой питается система охлаждения игнитронов. И в этом случае можно было избежать отключения, подключив систему охлаждения возбудителя в магистраль воздухоохладителя генератора. Оба внеплановых отключения возбудителя производились без отключения генератора от сети путем перевода его в асинхронный режим, а затем на машинное возбуждение. В период с 18 декабря по 26 мая 1956 г. было произведено шесть плановых отключений. Внеплановых отключений не было. Общее время работы возбудителя за год составило 7 900 *час*. С 6 июля 1955 г. возбудитель перевели с ручного регулирования на работу с автоматической системой компаундирования генератора. Часть тока компаундирования добавлялась в цепь подмагничивания пик-трансформаторов. Игнитронный возбудитель с системой компаундирования работает устойчиво; коэффициент усиления системы значительно выше, чем при машинном возбуждении, что снижает число операций с установочным реостатом при изменениях напряжения на шинах станции.

Опыт эксплуатации ионного возбудителя на тэц еще недостаточен для того, чтобы сделать какие-либо окончательные выводы, однако сейчас уже можно сказать, что: 1) трехфазная схема выпрямления с автоматическим включением буферного вентиля в аварийных режимах проста и достаточно надежна в эксплуатации; 2) обслуживание ионного возбудителя с запаянными вентилями не представляет больших трудностей для персонала станции.

Литература

1. Ю. А. Шмайн. Расчет схемы поджигания игнитронов. Электричество, № 4, 1956.

[28.5.1956]

** До включения на генератор возбудитель проработал на схему замещения ротора с полной нагрузкой около 1 000 *час*.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Реакция тока поперечной цепи якоря электромашинного усилителя

Кандидат техн. наук, доц. С. Ф. БЕРЕЗНИКОВСКИЙ
Ленинград

В электромашинном усилителе с поперечным полем токи в поперечной и продольной цепях якоря оказывают значительное влияние на поток продольной оси, создаваемый обмоткой возбуждения. Статические и переходные режимы усилителя при различной степени компенсации продольной реакции якоря исследованы в ряде трудов [Л. 1 ... 4]. Реакция поперечного тока якоря также рассматривается в нескольких трудах [Л. 2, 3, 5, 6 и 7]. Однако по этому вопросу нет еще общепринятых взглядов. Высказываются неодинаковые, иногда противоречивые суждения о составляющих реакции поперечного тока и об их размагничивающем действии. Ниже рассматриваются эти составляющие и даются методы их опытного определения с числовыми примерами для двух усилителей: АГ-3 4 *квт*, 250 *в*, 1 450 *об/мин* и ЭМУ-2,5 2,5 *квт*, 230 *в*, 2 900 *об/мин*. Рассматривается также влияние поперечной реакции якоря на основные свойства усилителя.

Составляющие реакции поперечного тока якоря и их экспериментальное определение. При возбуждении усилителя вхолостую уравнение н. с., действующих по продольной оси машины, в общем случае можно представить в следующем виде:

$$F_{во} = F_в - F_к - F_с - F'_{aq} \mp F'_{ad}, \qquad (1)$$

где $F_{во}$ — результирующая н. с., создающая продольный поток;

$F_в$ — н. с. обмоток возбуждения (результирующая);

$F_к$ — н. с. коммутационных токов в зоне поперечных щеток при отсутствии добавочных полюсов в этой зоне и замедленной коммутации;

$F_с$ — н. с., обусловленная вихревыми токами и гистерезисом в сердечнике якоря при перемагничивании его поперечным потоком;

F'_{aq} — н. с., эквивалентная поперечной реакции якоря при насыщении поперечным потоком путей продольного потока;

F'_{ad} — н. с. продольной рекции якоря, вызванная смещением поперечных щеток с нейтрали.

Из опытов возбуждения усилителя при разомкнутой поперечной цепи следует, что: а) характеристика холостого хода $E'_{q1}(F_в)$ прямолинейна или близка к прямолинейной (рис. 1); крутизна ее относительно большая [порядка (0,7 ... 0,9) *в/а* для рассматриваемых усилителей]; б) характеристика $E'_q(t)$ при скачкообразном импульсе возбуждения большой величины имеет апериодический характер (близка к экспоненте).

При возбуждении с замкнутой поперечной цепью (рис. 1) характеристика $E_{q1}(F_в)$ становится нелинейной в самом начале; ее крутизна, определяющая коэффициент усиления по напряжению, значительно меньше, чем у характеристики при разомкнутой цепи $E'_{q1}(F_в)$. Электродвижущая сила E_q была вычислена, как произведение тока на сопротивление поперечной цепи с учетом среднего сопротивления щеточного контакта. Таким образом, коэффициент усиления по напряжению первой ступени резко уменьшается при замыкании поперечной цепи вследствие реакции поперечного тока на продольный поток.

Характеристики второй ступени возбуждения усилителя $E(I_q)$ подобны характеристикам холостого хода нормальных машин постоянного тока, их крутизна уменьшается вследствие насыщения магнитной цепи поперечного потока при относительно больших значениях выходной э. д. с. Из сопоставления характеристик возбуждения по ступеням с общей характеристикой холостого хода следует, что резкое изменение крутизны последней определяется в основном изменением крутизны характеристики первой ступени.

Рассмотрим определение отдельных реакций в установившемся режиме.

Намагничивающая сила, обусловленная коммутационными токами, была определена методом, указанным в [Л. 5].

На рис. 2 приведены кривые $F_к(I_q)$ при различных значениях н. с. $F_в$, из которых видно, что с увеличением I_q н. с. $F_к$ возрастает по нелинейному закону.

Намагничивающие силы поперечной (F'_{aq}) и продольной (F'_{ad}) реакции якоря от тока поперечной цепи. Наличие

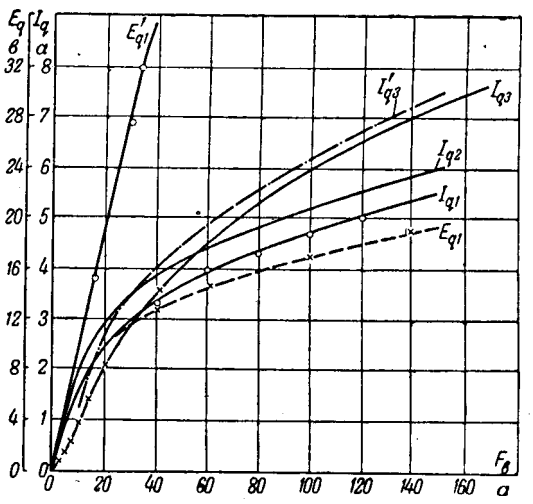


Рис. 1. Характеристики возбуждения первой ступени усилителя АГ-3.

E'_{q1} — э. д. с. при разомкнутой поперечной цепи; E_{q1} — э. д. с. при замкнутой поперечной цепи; $F_в$ — н. с. возбуждения; I_{q1}, I_{q2}, I_{q3} — токи в поперечных цепях усилителей № 1, 2 и 3; I'_{q3} — ток в поперечной цепи усилителя № 3 при другом направлении вращения.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

продольной н. с., несмотря на первоначальную установку щеток на нейтрали, обычно имеет место у всех машин и происходит из-за того, что ось токосъема щетки не совпадает с серединой зеркала щетки. У электромашинного усилителя даже небольшая величина F'_{ad} оказывает существенное влияние на баланс н. с. по продольной оси, причем F'_{ad} может иметь разные знаки. Для определения н. с. F'_{aq} и F'_{ad} при неподвижном якоре производились при помощи флюксметра измерения приращений магнитного потока в продольной оси, вызванные: а) включением тока возбуждения ($\Phi_{dв}$) и б) последующим включением тока поперечной цепи одного и другого направления ($\Delta\Phi_{ad}$).

Имея в виду, что величина F_{ad} изменяет знак при изменении направления тока в поперечной цепи, а величина F'_{aq} не меняет знака и остается приблизительно одинаковой, можно составить следующие уравнения:

$$\left.\begin{aligned} F_в + F'_{ad} - F'_{aq} &= F_{d1};\\ F_в - F'_{ad} - F'_{aq} &= F_{d2}. \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

Значения F_{d1} и F_{d2} определялись по кривой намагничивания усилителя в зависимости от результирующего потока $\Phi_{dв} + \Delta\Phi_{ad}$. Из уравнений (2) определялись:

$$F'_{ad} = \frac{F_{d1} - F_{d2}}{2};$$

$$F'_{aq} = \frac{2F_в - F_{d1} - F_{d2}}{2}.$$

В действительности величина F'_{aq} в уравнениях (2) неодинакова, так как при разных направлениях F'_{ad} насыщение магнитопровода будет различным. Однако учитывая, что это насыщение в основном определяется поперечным потоком, можно считать, что указанная неточность не вызывает значительной ошибки при определении н. с. Эта ошибка заключается в некотором преуменьшении F'_{aq} и F'_{ad} по сравнению с их действительными значениями.

На рис. 3 изображены кривые $F'_{aq}(I_q)$ при различных значениях $F_в$ для усилителя ЭМУ-2,5*. При выполнении опытов было отмечено, что при намагничивающем действии F'_{ad} увеличение продольного потока получается только при малых токах якоря, когда н. с. F'_{aq} равна нулю или мала. Переход от положительного приращения $\Delta\Phi_{ad}$ к отрицательному наступает при токах якоря тем меньших, чем больше н. с. $F_в$, так как при этом раньше проявляется насыщение. Следует также отметить, что при малых отрицательных установившихся значениях $\Delta\Phi_{ad}$ сначала наблюдается положительное приращение $\Delta\Phi_{ad}$ под действием н. с. F'_{ad}, а затем с некоторым запаздыванием проявляется размагничивающее действие поперечной реакции якоря.

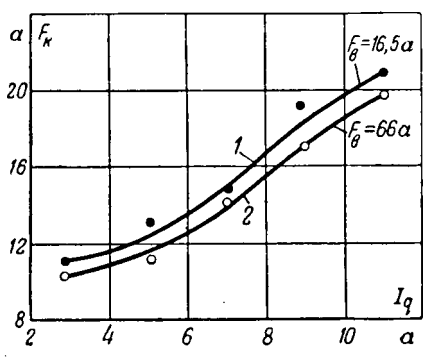


Рис. 2. Зависимость н. с. коммутационных токов ($F_к$) от тока в поперечной цепи (I_q) усилителя ЭМУ-2,5.
1 — при н. с. возбуждения $F_в$ = 16,5 *a*; 2 — при $F_в$ = 66 *a*.

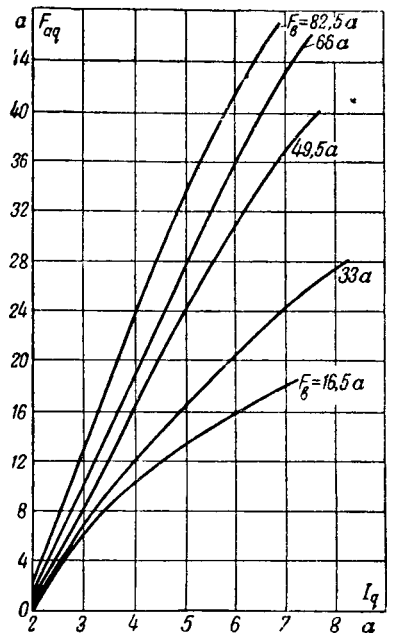


Рис. 3. Зависимость н. с. поперечной цепи якоря (F_{aq}) от тока в поперечной цепи (I_q) при различных значениях н. с. возбуждения ($F_в$) для усилителя ЭМУ-2,5.

Значения F'_{ad}, полученные при неподвижном якоре, могут несколько отличаться от таковых при вращающемся якоре. Последние можно определить, например, снимая характеристики холостого хода при разных направлениях вращения якоря и построив кривые $E_q(F_в)$. Для данного значения E_q полуразность абсцисс точек $F_{в1}$ и $F_{в2}$, лежащих на обеих кривых, приблизительно равна F'_{ad}. В действительности же при разных направлениях вращения будут неодинаковы также н. с. $F_к$, так что более строгое выражение для F'_{ad} можно написать в следующем виде:

$$F'_{ad} = \frac{F_{в1} - F_{в2} + F_{к2} - F_{к1}}{2}.$$

* Аналогичные кривые были получены для усилителя АГ-3.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Принимая $F_{к1}$ и $F_{к2}$ равными, получаем преуменьшенное значение F'_{ad}. Величина н. с. F'_{ad} в некоторых случаях может оказаться настолько большой, что вызывает самовозбуждение усилителя в области больших напряжений, без искусственного смещения щеток.

При выполнении указанных выше опытов была произведена сравнительная проверка измерения магнитного потока при вращающемся якоре при помощи флюксметра и путем измерения вольтметром э. д. с. с последующим вычислением потока на основании известных параметров усилителя. Сравнение показало вполне удовлетворительное совпадение результатов измерения потока обоими методами.

Определение суммы н. с. $(F_к + F_c)$ по характеристикам холостого хода при переменной скорости вращения усилителя. Кривые $I_q(n)$ при постоянной н. с. возбуждения, как известно, имеют максимум, т. е. при увеличении скорости вращения от некоторого малого значения, ток поперечной цепи I_q сначала возрастает, а затем убывает (рис. 4). При данной н. с. возбуждения $F_в$ продольный поток Φ_d с увеличением скорости от нуля уменьшается вследствие возрастающих реакций поперечного тока. Электродвижущая сила E_q, пропорциональная потоку Φ_d и скорости n, сначала возрастает (поток уменьшается в меньшей степени, чем возрастает скорость), а затем уменьшается, так как степень возрастания реакций увеличивается.

Наличие максимумов кривых $I_q(n)$ можно использовать для приближенного определения суммы $(F_к + F_c)$. Если н. с. $F_к$ определена другим способом, то можно найти н. с. F_c.

Рассмотрим две точки на кривой $I_q(n)$, для которых токи I_q одинаковы, а скорости n значительно отличаются, например в 5...10 раз. При меньшей скорости можно пренебречь размагничивающим действием $F_к$ и F_c, так как в сумме они приблизительно пропорциональны скорости. Напишем уравнения н. с.:

а) при малой скорости (n_1)

$$F_в = F_{во1} \pm F'_{ad1} + F'_{aq1} + F_{к1} + F_{c1}; \qquad (3)$$

б) при большой скорости (n_2)

$$F_в = F_{во2} \pm F'_{ad2} + F'_{aq2} + F_{к2} + F_{c2}. \qquad (4)$$

Пренебрежем $F_{к1}$ и F_{c1} и положим, что $F'_{ad1} = F'_{ad2}$ и $F'_{aq1} = F'_{aq2}$, так как ток I_q одинаков для обоих рассматриваемых режимов. В действительности F'_{aq1} несколько больше F'_{aq2} вследствие большей величины продольного потока при меньшей скорости. Приравнивая правые части (3) и (4), после сокращений получаем:

$$F_{к2} + F_{c2} = F_{во1} - F_{во2}. \qquad (5)$$

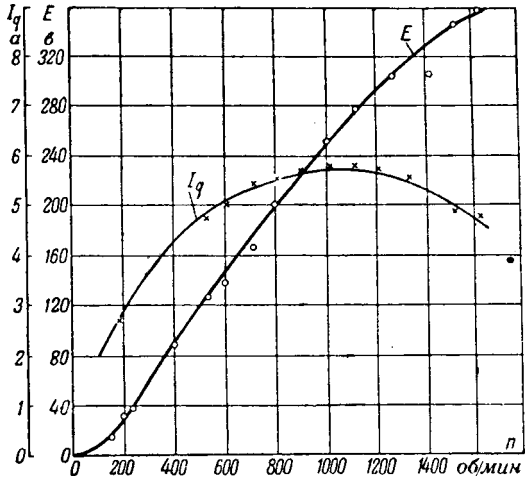


Рис. 4. Кривые зависимости тока в поперечной цепи (I_q) и э. д. с. на выходе (E) от скорости вращения усилителя АГ-3 при $i_в = 0{,}6$ *а* (200 витков на полюс; последовательная обмотка включена).

Вследствие сделанных допущений левая часть (5) получается несколько преуменьшенной. Намагничивающие силы $F_{во1}$ и $F_{во2}$ можно определить по характеристике холостого хода для разомкнутой поперечной цепи, зная э. д. с. E_q; при этом следует выполнить приведение к действительным скоростям режимов.

Баланс н. с., действующих по продольной оси. На основании опытов по определению отдельных н. с. указанными выше методами в табл. 1 приведены численные значения этих н. с., а также других показателей, характеризующих работу двух усилителей[1] (ЭМУ-2,5 и АГ-3) в рассматриваемых режимах.

Учитывая указанную выше погрешность при определении суммы н. с. $(F_к + F_c)$, ее значение при составлении баланса увеличивалось на 10...20% в зависимости от отношения скоростей n_1 и n_2.

Для некоторых позиций табл. 1 все составляющие н. с. определены независимо от уравнения баланса, при этом расхождение составило не более 5%; для большинства позиций одна из составляющих н. с. определялась из уравнения баланса.

Из рассмотрения табл. 1 следует, что размагничивающее действие $(F_к + F_c)$ компенсирует значительную часть общей намагничивающей силы $(F_в + F'_{ad})$ при возбуждении усилителя до э. д. с., приблизительно соответствующей номинальному режиму (277 *в* для ЭМУ-2,5 и 258 *в* для АГ-3); при возбуждении же до э. д. с., превышающих номинальную (что обычно имеет место при форсировках возбуждения в системах с усилителями), наибольшей размагничивающей составляющей становится F'_{aq}, которая ограничивает эффективность повы-

[1] При исследовании обоих усилителей реакция F'_{ad} была намагничивающей.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Таблица 1

Тип усилителя	n, об/мин	E, в	I_q, а	E_q, а	$F_в$, а	F'_{ad}, а	F'_{aq}, а	$F_к$, а	F_c, а	$F_{во}$, а
ЭМУ-2,5	2 920	277	3,35	5	25	16,5	8,5	11,4	15,6	6
То же	2 800	338	5,75	8,5	72	19	37	16	27	11
АГ-3 без последовательной обмотки	1 570	258	4,5	4,9	40	12	18	28		6
То же	1 730	310	5,0	5,5	120	13	68	58		7
» »	1 500	308	7,0	7,0	160	20	81	90		9
АГ-3 с последовательной обмоткой	1 660	362	4,5	15	120	12	68	49		15
То же	1 730	372	4,5	15	160	12	92	65		15

шенных форсировок возбуждения и обусловливает колебательный характер процесса.

Влияние реакции тока поперечной цепи на коэффициенты усиления и характеристики усилителя. Коэффициент усиления по напряжению первой ступени $\mu_{1н}$ резко уменьшается с увеличением возбуждения усилителя, что обусловлено реакциями поперечного тока. Уменьшение коэффициента усиления второй ступени $\mu_{2н}$ менее резкое, причем обычно $\mu_{2н} \gg \mu_{1н}$ (рис. 5).

Коэффициенты усиления по мощности отдельных ступеней усилителя (μ_{1p} и μ_{2p}) и полный (μ_p) также в значительной степени уменьшаются с возрастанием выходного напряжения (при данном токе нагрузки), причем μ_{2p} больше μ_{1p} и уменьшается менее резко с увеличением напряжения, что соответствует теоретическому анализу и видно из опыта (табл. 2).

Все данные табл. 2 относятся к нормальной компенсации и номинальному току нагрузки (100% э. д. с. соответствует $U_н$ и $I_н$).

Предыдущий анализ и данные табл. 2 опровергают распространенное утверждение некото-

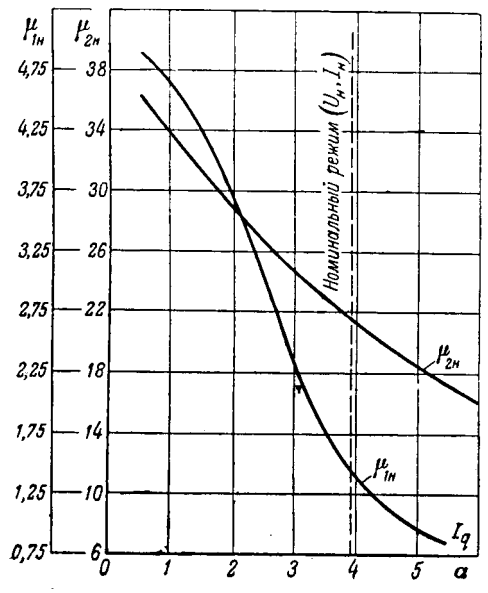


Рис. 5. Зависимость коэффициентов усиления по напряжению первой ($\mu_{1к}$) и второй ($\mu_{2к}$) ступеней от тока в поперечной цепи (I_q) усилителя АГ-3.

Таблица 2

Тип усилителя	E, %	U, в	P, квт	P_q, вт	P_1, вт	μ_{1p}	μ_{2p}	μ_p
ЭМУ-2,5	50	98	1,07	3,47	0,030	116	308	35 670
	100	230	2,5	17,3	0,445	39	144	5 620
	125	296	3,22	45,5	1,93	23,6	70,7	1 670
АГ-3	50	104	1,67	7,8	0,042	186	214	39 800
	100	250	4,0	57,7	2,8	20,6	69,3	1 430
	115	294	4,7	135	26,6	5,08	34,8	177

рых авторов, что $\mu_{1p} > \mu_{2p}$. Например, в книге А. Б. Челюсткина [Л. 8], неоднократно переизданной, повторяется неправильное указание о том, что для усилителей типичны показатели $\mu_{1p} = 400$; $\mu_{2p} = 20$. К такому выводу автор книги приходит на основании абстрактного рассмотрения усилителя как совокупности двух машин без учета реакций.

Анализ реакций поперечного тока усилителя позволяет объяснить некоторые особенности его характеристик. Например, изменение наклона внешних характеристик при уменьшении напряжения холостого хода, особенно резкое при некоторой перекомпенсации усилителя, объясняется уменьшением размагничивающих реакций при уменьшении возбуждения и большим относительным значением продольной н. с. от тока нагрузки.

Для некоторых усилителей получается необычная форма петли на характеристике холостого хода: при возбуждении до большого насыщения нисходящая ветвь петли располагается сначала ниже восходящей ветви, затем пересекает ее и идет выше. Результирующая н. с. возбуждения $F_{во}$ при большом значении $F_в$ мала по сравнению с последней. Уменьшение $F_в$ вызывает резкое уменьшение $F_{во}$, так как уменьшение размагничивающих реакций F'_{aq} и F_c происходит с запаздыванием относительно $F_в$. Продольный поток уменьшается сначала до значения меньшего, чем то, которое он должен иметь при новом значении $F_в$, и достигает установившегося значения не убывая, а возрастая.

Учет реакции тока в поперечной цепи при переходных процессах возбуждения. Возбуждение усилителя вхолостую до большой величины э. д. с. при подаче скачкообразного

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

импульса напряжения на обмотку управления происходит не апериодически, а с колебаниями (рис. 6). Причиной таких колебаний является реакция поперечного тока. Быстрое нарастание тока $i_в$ вызывает нарастание продольного потока и э. д. с. e_q до значений, превышающих установившиеся, вследствие запаздывания нарастания поперечного тока i_q и его размагничивающих реакций. Некоторые реакции, например F_c и в особенности F'_{aq}, проявляются с запаздыванием по отношению к i_q, что способствует перерегулированию и колебаниям последнего. Сравнительно меньше колебания потока Φ_q и. выходной э. д. с. Размагничивающее действие реакций возросшего тока i_q вызывает уменьшение продольного потока, вследствие чего происходит „всплеск" тока возбуждения, величина которого может достигать 1,5 ... 1,8 установившегося значения.

Начальный участок кривой $i_в(t)$ соответствует экспоненте, если в продольной оси усилителя отсутствуют замкнутые контуры, например зашунтированная компенсационная обмотка или другая обмотка управления. При наличии таких контуров, имеющих хорошую индуктивную связь с обмоткой возбуждения, происходит естественный начальный скачок тока возбуждения. Следует отметить, что секции, замкнутые накоротко щетками поперечной цепи, а также секции продольной цепи якоря, созданной при небольшом сдвиге поперечных щеток, не вызывают заметного скачка на кривой $i_в(t)$ вследствие того, что взаимоиндуктивность $M_{ва}$ между обмоткой возбуждения и контурами из указанных секций мала, что следует из формулы

$$M_{ва} = \frac{L_в}{\sigma_в} \frac{w'_{ad}}{w_в}, \qquad (6)$$

имея в виду, что допустимый при работе усилителя и наблюдаемый в эксплуатации сдвиг поперечных щеток бывает не больше, чем на 1 ... 1,5 коллекторных деления.

Обычно $M_{ва}$ составляет несколько сотых величины $L_в$. Величину такого же порядка, как $M_{ва}$, составляет и взаимоиндуктивность обмотки возбуждения с короткозамкнутыми секциями обмотки якоря в поперечной цепи ($M_{вкз}$).

Таким образом, при расчете переходного процесса возбуждения можно не учитывать индуктивных связей обмотки возбуждения с поперечной цепью якоря. Возникающая при этом ошибка мала, например, значительно меньше ошибки, получаемой в результате допущения постоянства параметров и линейных зависимостей для цепей усилителя. Малое влияние рассмотренных индуктивных связей на переходный процесс можно также установить из опытов, описанных в [Л. 7].

Значительно больше индуктивное влияние токов короткозамкнутых секций поперечной цепи

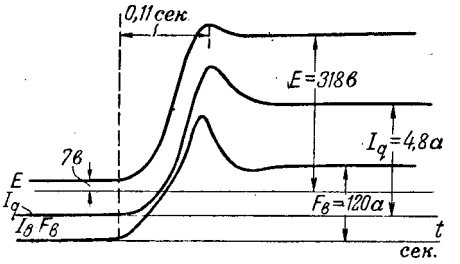


Рис. 6. Кривые переходного процесса усилителя АГ-3 при возбуждении вхолостую.

($I_{кз}$) на цепь возбуждения вследствие большой скорости изменения $I_{кз}$, величина которой может составлять несколько тысяч ампер в секунду.

На рис. 6 изображена постоянная составляющая тока $I_в$. Кривая действительного тока в цепи возбуждения имеет очень сложный характер благодаря наложению на постоянную составляющую зубцовых и коммутационных пульсаций. Последние относительно велики и возрастают с током I_q (не в прямой пропорциональности); их пики могут составлять около 30 ... 40% тока $I_в$. Наличие в коммутационных пульсациях тока $I_в$ отдельных резких пиков связано с возникновением пиков реактивной э. д. с. в нескольких коммутируемых секциях. Согласно опытным исследованиям [Л. 9] при замедленной коммутации кривая реактивной э. д. с. несимметрична и имеет резко выраженные пики. В коммутируемых секциях усилителя наводятся также э. д. с. вращения от внешнего поля, действующие согласно с реактивными э. д. с. При большой частоте коммутационных пульсаций (период коммутации секции для усилителя АГ-3 равен 0,001 *сек*) их влияние на продолжительность переходного процесса возбуждения усилителя можно не учитывать.

Уравнение, описывающее переходный процесс возбуждения усилителя вхолостую в общем случае (за исключением возбуждения до малых э. д. с.), следует составлять с учетом реакций поперечного тока. Точный учет каждой реакции в отдельности привел бы к сложному нелинейному уравнению, мало пригодному для практического использования. Для многих расчетов можно ограничиться введением в уравнение цепи возбуждения (7) или в уравнение для продольного потока (8) линейной функции, учитывающей обратную связь по поперечному току:

$$U_в = i_в r_в + ci + L_в \frac{di_в}{dt}; \qquad (7)$$

$$\Phi_d = (i_в w_в - a i_q) \lambda_d, \qquad (8)$$

где a и c — коэффициенты, определяемые по опытным или расчетным данным для установившегося режима;

λ_d — проводимость продольного потока.

Уравнением (7) можно пользоваться при рассмотрении процессов, для которых не требуется решения уравнения тока возбуждения.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

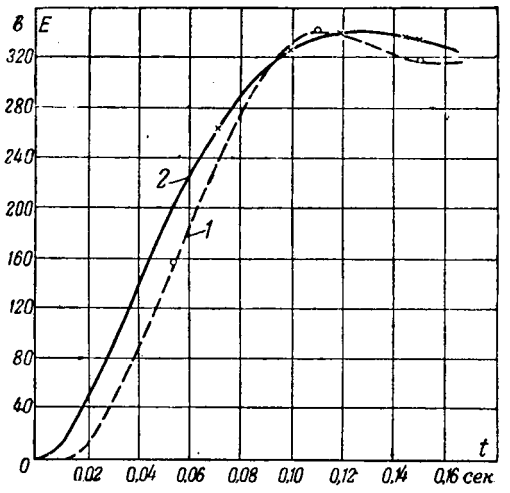


Рис. 7. Опытная (*1*) и расчетная (*2*) кривые возбуждения усилителя АГ-3.

Уравнения для э. д. с. усилителя в операторной форме [соответственно (7) и (8)] имеют следующий вид:

$$e(p) = \frac{\mu_к U_в}{p\left[p^2\tau_в\tau_q + p(\tau_в + \tau_q) + \frac{r_q + c\mu_{1к}}{r_q}\right]}; \qquad (9)$$

$$e(p) = \frac{\mu_к U_в}{p\left[p^2\tau_в\tau_q + p(\tau_в + \tau_q) + \frac{r_q + ac_e\lambda_d}{r_q}\right]}, \qquad (10)$$

где

$$c_e = \frac{p}{a}\,\frac{n}{60}\,\frac{N}{\sigma_в}.$$

В уравнении (9) коэффициент $\mu_{1к}$, а в (10) — λ_d следует принимать соответственно возбуждению усилителя при разомкнутой поперечной цепи. На рис. 7 для сравнения приведены опытная (из рис. 6) и расчетная [по уравнению (9)] кривые возбуждения усилителя.

Литература

1. М. П. Костенко. Электрические машины (специальная часть). Госэнергоиздат, 1949.
2. Н. Я. Якименко. Электромашинный усилитель как элемент регулирующей системы. Электричество, № 9, 1948.
3. Н. А. Моносзон. Электромашинный усилитель и принципы применения его в схемах. Академия им. А. Н. Крылова, Ленинград, 1950.
4. А. Т. Блажкин. Электромашинное автоматическое управление приводами. Металлургиздат, 1954.
5. М. И. Алябьев. Опытное определение коммутационной реакции в электромашинных усилителях с поперечным полем и в машинах постоянного тока. Электричество, № 2, 1952.
6. Я. С. Эпштейн. Особенности проектирования амплидинов. Электричество, № 12, 1945.
7. В. В. Рудаков. Влияние сдвига щеток поперечной цепи на переходный процесс электромашинного усилителя. Электричество, № 11, 1952.
8. А. Б. Челюткин. Электроавтоматика прокатных станов. Металлургиздат, 1952.
9. К. И. Шенфер. Динамомашины постоянного тока. Госэнергоиздат, 1932.

[21.5.1956]

◇ ◇ ◇

К расчету электромагнитов с внешним поворотным якорем

Кандидат техн. наук **Г. В. МОГИЛЕВСКИЙ**
Харьковский политехнический институт им. Ленина

Тяговый момент электромагнита постоянного тока с внешним поворотным якорем определяется по формуле

$$M = \frac{1}{2}U_p^2\frac{dG_p}{d\alpha},$$

где U_p — падение магнитного потенциала в „рабочем" воздушном зазоре;
G_p — магнитная проводимость зазора;
α — угол поворота якоря.

Очевидно, что точность его определения зависит от того, насколько точно будут установлены величины U_p, G_p.

Теории расчета распределения магнитных потоков и связанному с ним расчету U_p для электромагнитов рассматриваемого типа посвящено сравнительно много работ. В части же расчета G_p можно указать лишь на работы Н. К. Гальперна [Л. 1], Ф. А. Ступеля [Л. 2] и М. И. Витенберга [Л. 3], где определяются приближенные формулы на основе метода вероятных путей потока. Этим формулам свойственны следующие недостатки: 1) не учитываются размеры якоря; 2) в состав формул входят проводимости трубок индукции, выходящих из линии и не имеющих, следовательно, физического смысла; 3) формулы не проверены экспериментально.

Экспериментальная проверка формул, проведенная автором, показала, что они дают существенные погрешности, в особенности при максимальных углах поворота якоря. Погрешности в определении $\frac{dG_p}{d\alpha}$ достигают 30...40%. Ввиду того, что уточненный аналитический расчет G_p связан с большими трудностями, автор выполнил экспериментальную работу с целью получения эмпирической зависимости для G_p. Исследование проводилось на специально изготовленном макете магнитной системы, позволявшем изменять основные геометрические параметры, влияющие на проводимость G_p (рис. 1). Этими параметрами являются: L — расстояние между осью полюса и осью вращения якоря;

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

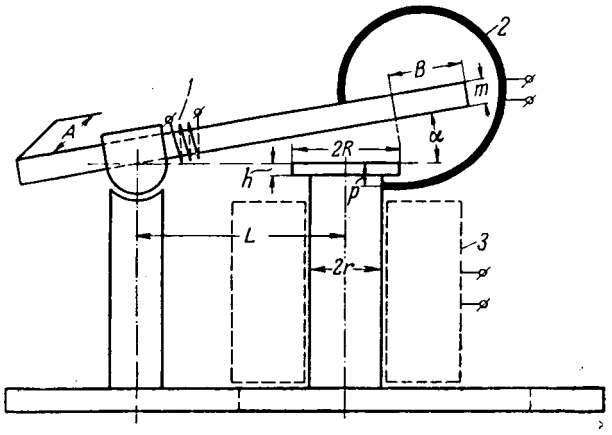


Рис. 1. Эскиз магнитной системы.
1 — измерительная катушка; *2* — потенциалометр; *3* — намагничивающая катушка.

R — радиус полюсного наконечника; r — радиус полюса; h — толщина полюсного наконечника; A — ширина якоря; m — толщина якоря; B — вылет якоря за полюсный наконечник.

Измерение магнитной проводимости G_p сводится к определению магнитного потока Φ_p и падения магнитного потенциала U_p. Поток Φ_p можно определить при помощи измерительной катушки *1*, располагаемой в начале якоря. U_p измеряется потенциалометром *2* (рис. 1).

Для упрощения процесса определения G_p автор применял дифференциальную схему (рис. 2). Можно показать, что для этой схемы при выполнении соотношения

$$G_p = \frac{\Phi_p}{U_p} = \frac{k}{w}\frac{r_1}{r_2},$$

где k — постоянная потенциалометра;
w — число витков измерительной катушки;
r_1 и r_2 — переменные омические сопротивления, отклонение указателя баллистического гальванометра при коммутации тока в цепи намагничивающей катушки равно нулю. Благодаря этому возможно непосредственное определение G_p, не измеряя предварительно Φ_p и U_p.

Измерение G_p производилось нами для следующих пределов параметров:

$$2 \leqslant l \leqslant 5;\ 0 \leqslant b \leqslant 3;\ 0 \leqslant a \leqslant 1;$$

$$0{,}12 \leqslant \frac{h}{R} \leqslant 0{,}35;\ 0{,}3 \leqslant \frac{m}{R} \leqslant 0{,}6;$$

$$0{,}5 \leqslant \frac{r}{R} \leqslant 0{,}8;\ 0 < \alpha \leqslant 0{,}3,$$

где

$$l = \frac{L}{R};\ b = \frac{B}{R};\ a = \frac{A}{2R} - 1.$$

Значения пределов выбраны на основании существующих конструкций магнитных систем контакторов и реле.

Предварительный анализ значительного количества экспериментальных данных показал, что при принятых пределах изменения параметров h, m и r изменение G_p колеблется в пределах 2...3%. Это позволило полагать G_p практически независимым от h, m и r, что значительно упростило построение эмпирической формулы. Вместе с тем это обстоятельство показывает неточность оценки влияния толщины полюсного наконечника в существующих формулах, где h входит в число основных переменных.

Эмпирическая формула была построена в виде поправочных коэффициентов к проводимости

$$G_0 = \frac{\mu_0 R\pi}{\alpha l}\,\frac{2}{1+\sqrt{1-\frac{1}{l^2}}},$$

которая приближенно равна G_p при $\alpha \to 0$[Л. 1]:

$$G_p = G_0 k_0 k_a k_b;$$

$$k_0 = \frac{1+(-3{,}55+7{,}12l-0{,}72l^4)\,\alpha}{1+4{,}55\alpha};$$

$$k_a = \frac{1+(10{,}6+1{,}25a)\,a\alpha}{1+8{,}75\alpha};$$

$$k_b = \frac{1+(0{,}14+0{,}313l)\,b\alpha}{1+(0{,}03b+0{,}26l)\,b\alpha}.$$

Поправочный коэффициент k_0 определяет влияние потоков „выпучивания“ при $a=0$ и $b=0$. Поправочные коэффициенты k_a и k_b учитывают влияние размеров якоря (при $a \neq 0$ и $b \neq 0$).

Точность совпадения экспериментальных данных с результатами расчета по предлагаемой формуле составляет 2...3%.

Формула предполагает отсутствие насыщения стали магнитной системы, что исключает влияние дополнительного падения магнитного потенциала на участке p (рис. 1). Для проверки влияния насыщения стали измерялась магнитная проводимость при индукции в полюсе до 1,7 *в·сек/м²* и в различных положениях верхнего конца потенциалометра. Это было вызвано тем обстоятельством, что при насыщенном якоре понятие магнитной проводимости зазора становится неопределенным, ибо поверхности стали якоря и ярма в значительной степени отключаются от эквипотенциальных. Как пока-

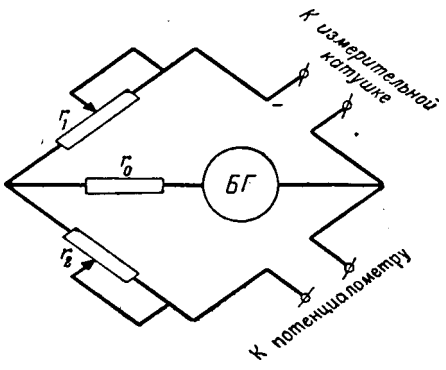


Рис. 2. Схема для измерения проводимостей.
БГ — баллистический гальванометр; r_0 — балластное сопротивление

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

зали экспериментальные данные, только при малых α уменьшение проводимости G_p достигает 3...4%. Перемещение же верхнего конца потенциалометра в пределах области, ограниченной расстояниями до оси вращения, равными $L+R$ и $L-R$, приводило к изменению G_p в пределах точности его измерения.

Наличие воздушного зазора между полюсом и полюсным наконечником могло вызвать появление систематической погрешности при измерении G_p. Однако вследствие шлифовки поверхностей проводимость этого добавочного воздушного зазора оказалась значительно больше G_p.

Анализ полученной эмпирической формулы показал, что изменение b в пределах 0...3 вызывает колебание значения G_p не более чем на 6%, а величины $\frac{dG_p}{d\alpha}$ не более чем на 3%. В существующих же конструкциях электромагнитов обычно $b \leqslant 1$. Отсюда следует, что целесообразно применять якори с $b=0$, так как это улучшает динамические характеристики электромагнитов.

С учетом последних замечаний относительно b следует, что с достаточной для практики точностью расчет $\frac{dG_p}{d\alpha}$ можно производить по следующей формуле:

$$-\frac{dG_p}{d\alpha}=\frac{G_p}{\alpha}\left[1-\left(\frac{1}{k_0}\frac{dk_0}{d\alpha}+\frac{1}{k_a}\frac{dk_a}{d\alpha}\right)\alpha\right],$$

где

$$\frac{dk_0}{d\alpha}=\frac{-8{,}1+7{,}12l-0{,}72l^2}{(1+4{,}55\alpha)^2};$$

$$\frac{dk_a}{d\alpha}=\frac{(1{,}9+1{,}25)\,a}{(1+8{,}75a\alpha)^2}.$$

Сравнение этой эмпирической формулы с принятыми показывает, что при больших α они дают завышенное значение G_p, вследствие чего производная $\frac{dG_p}{d\alpha}$ получается меньше действительного значения.

В качестве примера в табл. 1 приведены относительные отклонения в процентах проводимости G_p и ее производной по углу $\frac{dG_p}{d\alpha}$, определенных по формуле, предложенной Н. К. Гальперном [Л. 1].

В табл. 1 за 100% приняты данные, вычисленные по эмпирической формуле, которые близко совпадают с экспериментальными данными.

В принятых в статье обозначениях формула Н. К. Гальперна имеет следующий вид:

$$G_p=G_0+G_1+G_2,$$

где

$$G_0=\mu_0\frac{\pi R}{\alpha l}\frac{2}{1+\sqrt{1-\frac{1}{l^2}}};$$

$$G_1=\mu_0\frac{\pi^2}{\left(\frac{\pi}{2}+1\right)^3}R\left(\pi+2+\frac{\pi}{2}l\operatorname{tg}\alpha\right);$$

$$G_2=\mu_0 2h\left[\frac{R}{\sqrt{\left[\frac{h}{2}+(L-1)\operatorname{tg}\alpha\right]\left[\frac{h}{2}+(L+1)\operatorname{tg}\alpha\right]}}+1\right].$$

Расчет произведен при $\frac{h}{R}=0{,}16$ и $a=b=0$. Пределы изменения l и α являются наиболее характерными для существующих электромагнитов рассматриваемого типа. Наличие значительных отклонений при расчете $\frac{dG_p}{d\alpha}$ объясняется неудачным построением формулы для краевой проводимости G_1, так как производная $\frac{dG_1}{d\alpha}>0$.

Представляет также интерес оценить данные, получаемые по известной приближенной формуле, в которой расчет краевых проводимостей G_1 и G_2 проводится, исходя из упрощающего предположения о параллельности плоскости якоря и торца полюсного наконечника. В этом случае

$$G_p=G_1+G_2+G_0,$$

где

$$G_0=\mu_0\frac{\pi R^2}{\alpha L};$$

$$G_1=\mu_0 0{,}52\cdot 2\pi R=\mu_0 3{,}27\cdot R;$$

$$G_2=\mu_0\frac{2}{\pi}2\pi R\ln\left(1+\frac{h}{\alpha L}\right)=$$

$$=\mu_0 4R\ln\left(1+\frac{h}{\alpha L}\right).$$

Результаты расчета отклонений также приведены в табл. 1. Несмотря на приближенный характер формулы, отклонения G_p и $\frac{dG_p}{d\alpha}$ получаются меньше, чем в предыдущем случае. Это вызвано в основном сравнительно более высокой точностью выражения для проводимости G_1.

Таблица 1

Сравнительные данные расчета G_p и $\frac{dG_p}{d\alpha}$ по разным формулам

α	l	По формуле Н. К. Гальперна		По приближенной формуле	
		G_p	$\frac{dG_p}{d\alpha}$	G_p	$\frac{dG_p}{d\alpha}$
0,2	2	112	96	115	99
	3	106	82	104	87
	4	109	76	104	81
0,3	2	126	85	124	94
	3	121	62	113	79
	4	130	53	113	72

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Удаление электростатических зарядов путем ионизации воздуха

Инж. В. Н. ЕГОРОВ
Московский институт химического машиностроения

При многих промышленных технологических процессах побочно образуется статическое электричество, которое ограничивает производительность действующего оборудования и может явиться причиной пожаров и взрывов, а также различного рода неполадок в оборудовании. Нередко электростатические заряды нарушают технологический процесс и ведут к браку продукции. От образования статического электричества особенно страдают заводы резинотехнических изделий.

В статье рассматривается эффективность удаления электростатических зарядов с прорезиненных тканей промазочных машин методом ионизации воздуха. Возникающие на этих тканях заряды часто приводят к воспламенению смеси паров бензина или бензола с воздухом.

Сущность метода. При описываемом методе генерируемый на теле статический заряд нейтрализуется ионами, образуемыми в воздухе под действием постоянного ионизирующего агента.

При ширине ткани b заряд, образованный в 1 *сек* на площади ткани bx,

$$Q = \sigma bx \left[\frac{к}{сек}\right], \qquad (1)$$

где x — путь, проходимый тканью в 1 *сек*;
σ — поверхностная плотность образующихся зарядов.

Заряд, доставляемый источником ионизации на участке bx_1,

$$Q_1 = j_n bx_1, \qquad (2)$$

где x_1 — длина участка ионизированного воздуха над тканью. Отсюда потребная плотность полярного ионного тока j_n, нейтрализующего заряд ткани,

$$j_n = \sigma \frac{x}{x_1}\left[\frac{а}{см^2}\right]. \qquad (3)$$

В зависимости от величины напряженности электрического поля E, которое создается зарядами ткани, в процессе удаления зарядов возможны два предельных случая.

При достаточно высокой напряженности поля практически почти все ионы, образуемые в воздухе под действием внешнего ионизатора, будут достигать поверхности ткани и ионный ток, нейтрализующий заряд, будет соответствовать току насыщения. В этом случае требующаяся интенсивность ионизирующего агента $q_н$, измеряющаяся числом пар ионов, которые образуются в 1 *сек* в 1 $см^3$ воздуха,

$$q_н = \frac{\sigma x}{e x_1 d}\left[\frac{ион}{см^3 \cdot сек}\right]. \qquad (4)$$

Здесь d — высота слоя ионизируемого воздуха на участке bx_1, *см*;
$e = 1{,}59 \cdot 10^{-19}$ $к$ — заряд иона.

Полная интенсивность потребного источника ионизации

$$q_н^n = \frac{\sigma bx}{e}\left[\frac{ион}{сек}\right]. \qquad (5)$$

При слабой напряженности поля поверхности ткани достигают только ионы, находящиеся вблизи нее, и ионный ток, нейтрализующий заряд, будет пропорционален E. Для этого случая потребная интенсивность ионизирующего агента

$$q_o = \alpha \left[\frac{\sigma x}{e x_1 k E}\right]\left[\frac{ион}{см^3 \cdot сек}\right], \qquad (6)$$

где α — коэффициент рекомбинации ионов, $см^3 \cdot сек^{-1}$;
k — подвижность ионов, $см^2 \cdot в^{-1} \cdot сек^{-1}$.

При напряженности поля, обеспечивающей ионный ток полунасыщения, когда уже проявляется действие рекомбинации ионов, выражение для потребной интенсивности ионизирующего агента принимает следующий вид:

$$q_{п.н} = \frac{\sigma x}{e x_1 d} + \alpha n^2 \left[\frac{ион}{см^3 \cdot сек}\right], \qquad (7)$$

где n — число пар ионов в 1 $см^3$ воздуха (концентрация ионов).

Как указывалось, исследование проводилось на макете магнитной системы; с целью проверки точности эмпирической формулы были экспериментально определены магнитные проводимости основного рабочего зазора у ряда магнитных систем контакторов постоянного тока. Полученные данные сравнивались с расчетными, определяемыми по эмпирической формуле. Во всех случаях отмечалось хорошее совпадение экспериментальных и расчетных данных. Для примера в табл. 2 даны расчетные и экспериментальные значения проводимости основного рабочего зазора контактора типа КП-503.

Таблица 2

Сравнение расчетных и экспериментальных значений проводимости

α		0,20	0,15	0,10	0,05
$G_p \cdot 10^7$ *в·сек/а*	Эксперимент	2,80	3,49	4,65	8,08
	Расчет	2,74	3,40	4,57	7,82

Литература

1. Ф. А. Ступель. Расчет и конструкция электромагнитных реле. Госэнергоиздат, 1950.
2. М. И. Витенберг. Расчет телефонных и кодовых реле. Госэнергоиздат, 1947.

[6.9.1955]

◇ ◇ ◇

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Напряженность поля, необходимая для достижения тока насыщения, варьируется в зависимости от рода ионизатора, его интенсивности и других условий. Для нормального свободного воздуха она составляет 10...50 *в/см*.

Методика определения эффективности ионизирующих агентов. Ионизирующее действие того или иного агента или, точнее, его ионизационный эффект, определяющий возможность удаления создаваемых на ткани зарядов, может быть найден в основном при помощи двух следующих методов: 1) измерения тока насыщения; 2) измерения проводимости воздуха.

Однако как интенсивность ионизации q, так и проводимость воздуха $\lambda_{\pm}$ в отдельности не характеризуют эффективности снятия зарядов вследствие того, что под действием внешних ионизаторов могут иметь место как ионный ток насыщения, так и „омический" ток, называемый током полунасыщения. Поэтому при исследовании процесса интенсивность снятия зарядов измерялась средней плотностью ионного тока $j_{\pm}$ за время снятия заряда. Временем снятия заряда мы называем то время, за которое заряд снижается до безопасного значения.

Испытания проводились следующим образом: образцы различных материалов емкостью C_1 равномерно заряжались до потенциала, несколько превышающего 2 125 *в*, после чего они подвергались действию ионизирующего облучения. По электрометру определялось такое среднее время снятия заряда Δt с системы, состоящей из образца материала, провода и прибора, при котором потенциал снижается от $U_0 = 2\,125$ *в* до вполне безопасного значения $U_t = 335$ *в*. Затем испытание повторялось при удаленном образце материала и определялось среднее время снятия заряда Δt_2 только с прибора и провода, общая емкость которых C_2.

Средняя плотность относительного полярного ионного тока

$$j_{\pm} = \frac{C_2}{S_1}\left(\frac{n}{\Delta t} - \frac{1}{\Delta t_2}\right)(U_0 - U_t)\left[\frac{a}{см^2}\right], \qquad (8)$$

где S_1 — площадь образца материала, $см^2$;

$n = \frac{C_1 + C_2}{C_2}$ — отношение емкости системы, включающей материал, к емкости той же системы без материала.

Сумма обоих полярных ионных токов, полученных измерением скорости снятия положительного и отрицательного зарядов на материалах под действием данного ионизирующего агента, условно принималась нами за полный ток. Таким образом, средняя плотность относительного полного ионного тока

$$j = j_+ + j_-\left[\frac{a}{см^2}\right]. \qquad (9)$$

Для оценки меры преобладания скорости снятия зарядов того или иного знака в каждом случае подсчитывалось отношение

$$q_i = \frac{j_+}{j_-}. \qquad (10)$$

Условием достаточности интенсивности ионизатора являлось соотношение

$$j_{\pm} \geqslant j_n, \qquad (11)$$

где $j_{\pm}$ определяется по (8), а j_n — по (3).

После исследования снятия зарядов с материалов в статическом состоянии действие ионизатора проверялось на лабораторной промазочной машине при прокатывании различных прорезиниваемых тканей со скоростью 18 *м/мин*.

Экспериментальное исследование. Исследование производилось при ионизации воздуха следующими агентами: электрическим полем высокого напряжения частоты 50 *гц*, высокочастотным электрическим полем, радиоактивными излучениями, газовым пламенем, ультрафиолетовыми лучами, рентгеновскими лучами.

Испытывались следующие материалы: войлок, шерстяная ткань «Рекорд», полушерстяные ткани (кашемир и шотландка), хлопчатобумажные ткани (коверкот, плащпалатка, ситец, шифон и киперная ткань) и оловянная фольга. На этих же материалах определялась также средняя скорость утечки зарядов в свободном, не ионизируемом воздухе. Экспериментально полученные данные выявили некоторые закономерности разряжения материалов.

Электрическое поле высокого напряжения частоты 50 гц. Принципиальная электрическая схема ионизирующей установки изображена на рис. 1. Она состоит из разрядника P с рядом остроконечных штифтов, подключенного ко вторичной обмотке небольшого высоковольтного трансформатора T. Штифты получают высокий потенциал 11 *кв*, который периодически меняет знак. Градиент потенциала вблизи острых концов штифтов настолько высок, что интенсивные процессы прямой и ступенчатой ионизации пограничного объема воздуха соударениями 1-го рода сопровождаются во время пика каждого полупериода небольшим коронным разрядом. В результате во внешней области коронного разряда создается движение положительных и отрицательных ионов, в основном соответственно знаку электрода. Эти ионы образуют пространственный заряд, препятствующий прохождению разрядного тока.

Так как за время одного полупериода ионы данного знака не успевают дойти до противоположного электрода, то происходит своеобразное колебание пространственных зарядов вдоль силовых линий. Ионы, знак которых противоположен электростатическому заряду материала, извлекаются и притягиваются к поверхности материала, нейтрализуя на нем заряд.

Исследование показало эффективность способа ионизации электрическим полем высокого напряжения частоты 50 *гц*. Среднее значение плотности полного ионного тока при снятии зарядов на всех названных выше тканях на расстоянии 100 *мм* от коронирующего электрода, заключенного в цилиндрический экран диаметром 100 *мм* с продольной щелью шириной 35 *мм*, составило $1{,}87 \cdot 10^{-10}$ $а/см^2$ и только на прорезиненных тканях плот-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

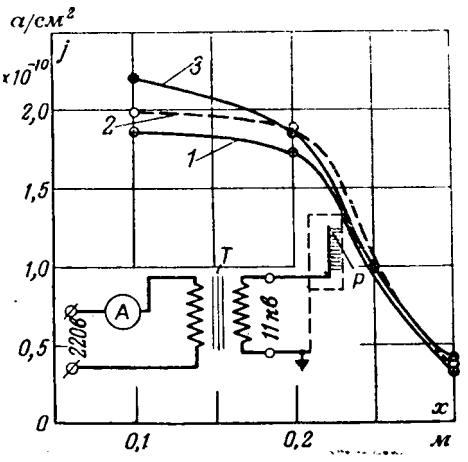


Рис. 1. Плотность полного ионного тока при ионизации полем высокого напряжения частоты 50 *гц* в зависимости от расстояния от электрода.
1 — ткань кашемир; *2* — то же прорезиненная; *3* — фольга.

ность была $1{,}9 \cdot 10^{-10}$ *а/см²*. Плотность полного ионного тока в зависимости от расстояния до электрода для материалов кашемир и фольга представлена на рис. 1. Как видно, при ионизации переменным электрическим полем частоты 50 *гц* выявляется наличие определенного порога ионного тока, нейтрализующего заряд, который расположен на расстоянии 200 *мм* от коронирующего электрода напряжением 11 *кв*. На участке до этого порога скорости снятия зарядов обоих знаков почти одинаковы. На больших расстояниях положительный заряд снимается быстрее отрицательного и отношение скоростей составляет 0,8.

Высокочастотное электрическое поле высокого напряжения. Принципиальная схема высокочастотного ионизатора показана на рис. 2. Он представляет собой генератор затухающих колебаний высокой частоты (94 *кгц*) типа аппарата д'Арсонваля марки ДМП-5. Генератор снабжен игольчатым разрядником.

Данная установка действует подобно предыдущей. Однако если при переменном токе низкой частоты разряд представляет чередование отдельных близких к синусоидальным импульсов тока, то в схеме рис. 2 этого не наблюдается вследствие того, что образующиеся при разряде пространственные заряды не успевают перестраиваться при перемене направления поля. Явления у обоих электродов в этом случае протекают симметрично и необходимое число свободных электронов у каждого из них образуется путем ионизации частиц воздуха соударениями 1-го рода. Благодаря колебательному движению в такт быстропеременному полю и поступательному движению в оба направления, электроны пробегают в межэлектродном пространстве длинный путь, что приводит к большой вероятности встречи их с частицей газа и интенсивной ионизации.

Исследование снятия зарядов ионизацией воздуха высокочастотным полем высокого напряжения показало эффективность и этого способа. Среднее значение плотности полного ионного тока при снятии зарядов на всех тканях на расстоянии 100 *мм* от коронирующего электрода при напряжении 57 *кв* составило $12{,}95 \cdot 10^{-11}$ *а/см²* и только на прорезиненных тканях $13{,}1 \cdot 10^{-11}$ *а/см²*.

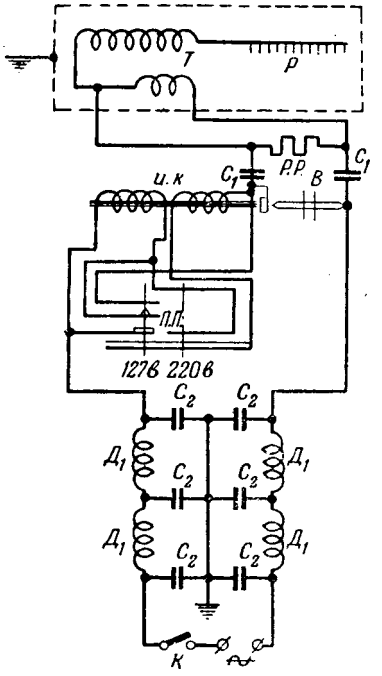


Рис. 2. Принципиальная схема высокочастотного ионизатора.
Р — игольчатый разрядник; *Т* — трансформатор высокой частоты; C_1 — конденсатор 0,5 *мкф*; *В* — вибратор; *ПП* — панель переключения; *РР*— реостат; *К* — выключатель; *ИК*—индукционная катушка; C_2 — конденсатор фильтра; $Д_1$ — дроссель фильтра.

Для всех тканей среднее значение $q_j = 1{,}056$, а для прорезиненных — 1,07, чему соответствует большая скорость снятия отрицательного заряда. Явление зависимости q_j и j от степени «гладкости» поверхности (табл. 1) обусловлено наличием некоторой вторичной электронной эмиссии — выходом из тел электронов проводимости благодаря энергии, переданной им бомбардирующими электронами.

На рис. 3 приведены для ткани кашемир зависимости отрицательного (рис. 3,*а*) и положительного (рис. 3,*б*) ионных токов от расстояния до коронирующего электрода, находящегося под напряжением 27, 46, 53 или 57 *кв*. Как видно из кривых, для метода ионизации высокочастотным полем также характерно наличие определенного порога, который наблюдался и при ионизации полем промышленной частоты. Однако здесь этот порог ближе к электроду (125 ... 150 *мм*); кроме того, при положительном ионном токе порог более резко зависит от напряжения на электроде и при 27 *кв* он лежит в пределах 50 *мм*. Если на отрицательный ионный ток изменение напряжения на электроде в пределах 27 ... 57 *кв* не оказывало сильного влияния, то положительный ионный ток резко возрастает с увеличением напряжения и тем круче, чем больше расстояние до электрода. Это отчетливо видно из графика

Таблица 1

Материал	$q_j = \frac{j_+}{j_-}$	$j \cdot \frac{a}{см^2} \cdot 10^{-10}$	Примечание
Фольга оловянная	1,11	1,417	$U = 57$ *кв*;
Ткани прорезиненные	1,07	1,31	$x = 100$ *мм*; диаметр экрана
Ткани чистые . .	1,043	1,28	140 *мм*; щель экрана 15 *мм*

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

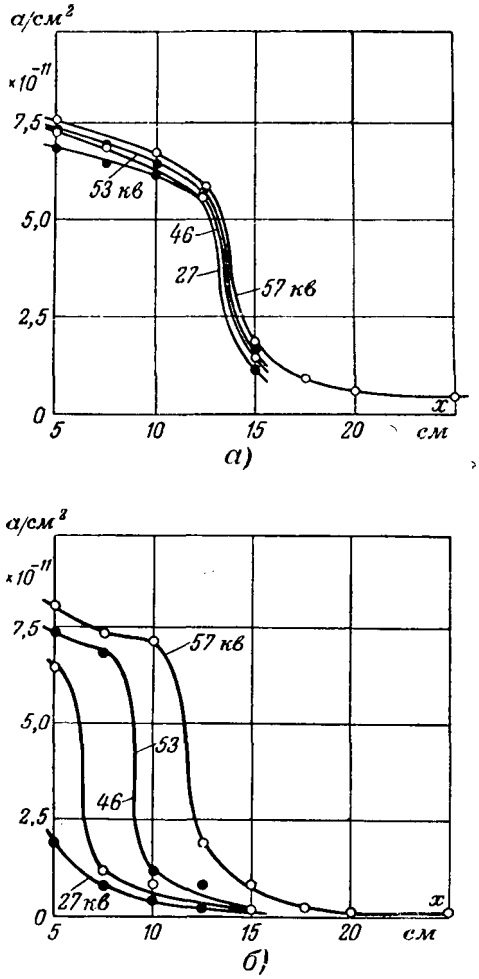


Рис. 3. Плотность полярного ионного тока при ионизации воздуха полем высокой частоты различной напряженности в зависимости от расстояния от образца до электрода. *а* — плотность j_-; *б* — j_+ (диаметр экрана электрода 100 *мм*, щель в экране 20 *мм*; ткань—кашемир).

рис. 4. Характерным является также то, что на расстояниях до 100 *мм* и при высоком напряжении на электроде 57 *кв* положительный ток больше отрицательного, но при увеличении расстояния или уменьшении напряжения ток становится сначала равным отрицательному, а затем меньше его. Эти особенности хорошо иллюстрируются зависимостью q_j от напряжений на электроде и расстояний, данных на рис. 5.

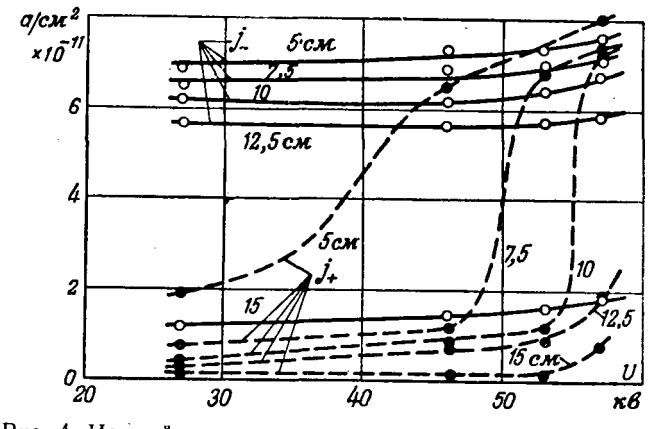


Рис. 4. Ионный ток в зависимости от расстояния от образца ткани („кашемир") до электрода при ионизации полем высокой частоты (диаметр экрана электрода 100 *мм*, щель в экране 20 *мм*).

Полученные зависимости говорят, что в процессах снятия зарядов ионизацией высокочастотным полем высокого напряжения существенное значение имеют электроны и отрицательные ионы. При положительном заряде тела имеет место их направленное движение к поверхности материала за счет в основном поля материала. В этом случае нейтрализующий ионный ток мало зависит от напряжения на коронирующем электроде и — в известных пределах — от расстояния. Наличие порога ионизации, очевидно, объясняется тем, что при потенциале материала порядка 680 *в* и расстоянии 125 ... 150 *мм* напряженность поля уже не обеспечивает ионный ток насыщения.

При отрицательно заряженном теле снятие заряда происходит как за счет положительных ионов, так и за счет процессов вторичной электронной эмиссии. В этом случае, естественно, напряжение на электроде и расстояние от него существенно влияют на скорость снятия зарядов, поскольку от них зависит величина энергии первичных электронов. При определенных условиях (57 *кв* и расстоянии около 100 *мм*), энергии первичных электронов, которую они способны передать вторичным, недостаточно для выхода электронов, и тогда мы наблюдаем порог ионизации, при котором резко падает скорость снятия зарядов.

Радиоактивные излучения. В качестве ионизатора применялся радиоизотоп Co^{60}, нанесенный ровным слоем на металлическую пластинку. Общая активность радиоактивного препарата составляла 20 *мК* при активной поверхности 180 *см²*. Пластина активным слоем устанавливалась к поверхности заряженного материала так, что пространство между ней и поверхностью пронизывалось ионизирующими воздух γ- и β-лучами. Интенсивность ионизации составляла примерно $2 \cdot 10^7$ *ион/сек* на квадратный сантиметр активного слоя пластины. Для всех тканей среднее значение плотности полного ионного тока на расстоянии 100 *мм* от активного слоя препарата составило $3{,}15 \cdot 10^{-11}$ *а/см²*, только на прорезиненных тканях плотность тока была $3{,}1 \cdot 10^{-11}$ *а/см²*. Повышенная плотность тока $4{,}39 \cdot 10^{-11}$ *а/см²* замерена у оловянной фольги. Среднее значение $q_j = 0{,}969$, на прорезиненных тканях — 0,964, что соответствует большей скорости снятия положительного заряда. На рис. 6 и 7 даны кривые плотности полного и полярного ионного тока в зависимости от расстояния источника излучения при снятии зарядов с фольги и ткани «кашемир». Как видно из кривых, с увеличением расстояния ионный ток сначала возрастает и при положении источника излучения на 175 *мм* от материала достигает максимума. При дальнейшем увеличении расстояния ионный ток падает; начиная с 200 ... 250 *мм*, он убывает пропорционально квадрату увеличения расстояния. Можно полагать, что

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

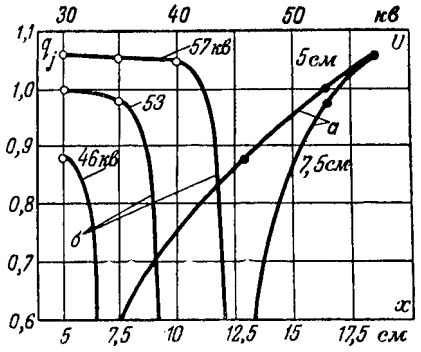


Рис. 5. Отношение q_j при ионизации высокочастотным полем в зависимости от расстояния до электрода (а) и напряжения на электроде (б).

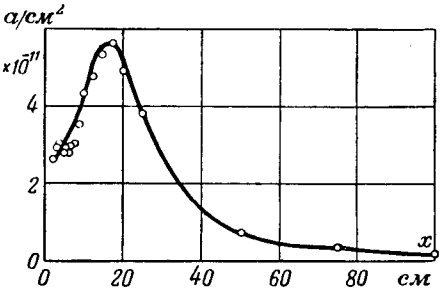


Рис. 6. Плотность полного ионного тока при снятии зарядов с оловянной фольги путем ионизации воздуха γ- и β-излучением радиоизотопа Co^{60} (удельная активность препарата $0{,}11\ \frac{мК}{см^2}$).

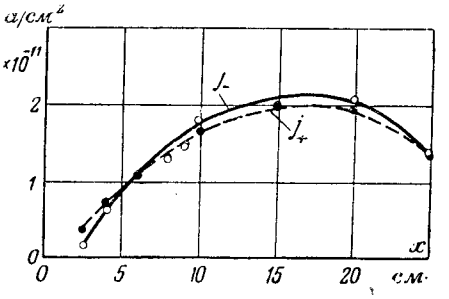


Рис. 7. Плотность полярного ионного тока при снятии зарядов с ткани кашемир ионизацией γ- и β-излучением радиоизотопа Co^{60} (удельная активность препарата $0{,}11\ \frac{мК}{см^2}$).

в этой области ионизирующее действие данного рода излучений обратно пропорционально квадрату расстояния от источника:

$$j_x = j_0 \frac{e^{-\mu x}}{x^2}, \qquad (12)$$

где j_0 и j_x — плотность ионного тока или ионизирующее действие излучения на данном расстоянии и на расстоянии x;

μ — коэффициент абсорбции, учитывающий в данного рода лучах комптоновское поглощение; для воздуха μ очень мало.

Сравнительная оценка эффективности ионизирующих агентов. В табл. 2 дана максимальная плотность полного ионного тока j при снятии зарядов на ткани кашемир[1] ионизацией воздуха различными ионизирующими агентами при практически целесообразных источниках.

Для оценки преобладания скорости снятия зарядов того или иного знака дано отношение $q_j = \frac{j_+}{j_-}$. Сравнительная эффективность ионизаторов характеризуется отношением плотности j при действии данного ионизирующего агента к тому значению, когда агент отсутствует.

Повышенное ионизирующее действие электрического поля 50 *гц* по сравнению с высокочастотным полем — 94 *кгц* объясняется разной мощностью короны при незатухающих и затухающих колебаниях (логарифмический декремент затуха-

[1] При газовом пламени применялась ткань „шотландка".

Таблица 2

Ионизирующий агент	Характеристика источника	Расстояние от источника до материала, *мм*	Плотность полного ионного тока, j, *а/см²*	q_j	Отношение j при действии агента к j в свободном воздухе, Δ	Примечание
Свободный нормальный воздух	—	—	$5{,}12 \cdot 10^{-11}$	0,9	1	
Газовое пламя	Нормальная газовая горелка с обдувом	200 $a = 400$ *мм*	$3{,}84 \cdot 10^{-11}$	1,06	750	Ткань шотландка
Ультрафиолетовые лучи	Дуга ртутно-кварцевой лампы ПРК-2, 375 *вт*	250	$4{,}09 \cdot 10^{-12}$	2,34	80	Электронно-ионный ток
Рентгеновские лучи	Рентгеновская трубка 4РДВ-100, $U_a = 70$ *кв*, $I_a = 0{,}2$ *ма*	500	$4{,}88 \cdot 10^{-11}$	0,97	955	
Электрическое поле высокого напряжения	$U = 11$ *кв*, $f = 50$ *гц*	100	$1{,}86 \cdot 10^{-10}$	0,94	3 630	Электронно-ионный ток
Электрическое поле высокого напряжения высокой частоты	Генератор затухающих колебаний, $U = 57$ *кв*, $f = 94$ *кгц*	50	$1{,}565 \cdot 10^{-10}$	1,06	3 055	Электронно-ионный ток
γ- и β-лучи	Изотоп Co^{60} (удельная активность 0,11 *мК/см²*)	175	$3{,}99 \cdot 10^{-11}$	0,94	780	

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ния контура $f = 0{,}017$). В случае использования генераторов высокой частоты с незатухающими колебаниями эффективность ионизации высокочастотным полем будет выше, чем при ионизации переменным полем 50 *гц*.

В табл. 2 даны оптимальные в экспериментах расстояния от источника ионизации до поверхности заряженного материала.

Выводы. 1. Методика определения эффективности ионизирующего агента данной интенсивности по средней плотности ионного тока j за период снятия зарядов практически приемлема.

2. Ионизация газовым пламенем, ультрафиолетовыми и рентгеновскими лучами непригодна для снятия зарядов с промазочных машин. Газовое пламя является мощным ионизирующим фактором, но оно неприменимо из-за пожарной опасности. Интенсивность ионизации ультрафиолетовыми лучами недостаточна и, кроме того, лучи главным образом снимают отрицательный заряд, а на промазочных машинах мы имеем в основном положительный заряд. Рентгеновские лучи являются интенсивным ионизирующим агентом, но требуют защиты от вредного их воздействия на обслуживающий персонал; кроме того, соответствующая аппаратура неудобна в эксплуатации.

3. В пределах проведенных опытов из всех исследованных агентов данной интенсивности максимальную скорость снятия зарядов показывают электрические поля высокого напряжения. Благодаря безопасности токов высокой частоты лучшим следует признать способ снятия зарядов ионизацией высокочастотным полем высокого напряжения с применением аппаратуры в пожаро- и взрывобезопасном исполнении.

4. Снятие зарядов ионизацией воздуха радиоактивными излучениями изотопа Co^{60} нецелесообразно по причине трудности защиты от вредного воздействия γ-лучей. Вполне применимы для указанных целей плутоний 238, а также полоний 210, дающие только α-излучение.

Работа выполнена на кафедре техники безопасности МИХМ. Автор выражает благодарность руководителю И. С. Ройзену, а также Н. Д. Тишкину и А. Е. Правдолюбову.

Литература

1. Н. Г. Дроздов. Статическое электричество в промышленности. Госэнергоиздат, 1949.

2. Н. А. Капцов. Электрические явления в газах и вакууме. ГТТЛ, 1950.

3. Н. А. Капцов Электроника. ГТТЛ, 1953.

4. Н. Г. Дроздов и В. А. Смирнов. Труды МЭИ, № 3, 1937.

[7. 3. 1956]

✧ ✧ ✧

Искробезопасность электрооборудования в атмосфере взрывоопасных смесей

Доктор техн. наук В. С. КРАВЧЕНКО
Институт горного дела Академии наук СССР

Инж. П. А. ФЕТИСОВ
Центральный научно-исследовательский институт противопожарной обороны

Искробезопасные электрические устройства малой мощности нашли широкое применение на угольных шахтах, опасных по газу или пыли, как в Советском Союзе, так и за границей, особенно в Англии, где в 1952 г. уже насчитывалось около 300 видов нового искробезопасного электрооборудования.

Электрическая аппаратура автоматизации, дистанционного управления, связи и сигнализации, выполненная по принципу искробезопасности, значительно упрощается, уменьшается в весе, а ее эксплуатация становится проще и безопаснее. Проведенные нами в ЦНИИПО в 1953—1956 гг. исследования показали перспективность использования искробезопасных систем не только в угольных шахтах, но и на предприятиях химической, нефтяной и нефтеперерабатывающей промышленности, где также приходится иметь дело с воспламеняющейся производственной атмосферой.

Список широко распространенных взрывчатых газовоздушных и паровоздушных смесей насчитывает более 40 наименований. Некоторые из этих смесей — пары бензина, бензола, нефтяной газ и др. — по своей агрессивности мало отличаются от рудничного газа. В таких смесях, используя искрогасящие шунты, можно применять открытое электрооборудование при передаваемых мощностях до 35 *вт*. Другие взрывчатые смеси воспламеняются легче, чем рудничный газ, однако и для этих смесей также могут быть найдены параметры безопасного искрения (ток, индуктивность, напряжение).

Экспериментальные параметры безопасного искрения — характеристики искробезопасности, полученные нами для взрывчатых смесей водорода, этилена, пропана, ацетона и эфира с воздухом, показали, что и в этих весьма опасных взрывчатых средах возможно применение искро-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

безопасного электрооборудования. Прежде чем приводить упомянутые экспериментальные данные, остановимся на методической стороне вопроса.

Определение допустимых значений токов размыкания встречает серьезные затруднения, связанные с вероятностным характером зажигания от электрических разрядов размыкания [Л. 1]. При многократном повторении размыканий одной и той же цепи с одними и теми же параметрами взрывы газа во взрывной камере то происходят, то не происходят. В этих условиях приходится оценивать воспламеняющую способность искрения по величине вероятности воспламенения и находить безопасные токи, соответствующие некоторым весьма низким, близким к нулю вероятностям воспламенения, например 10^{-5}. В английской практике безопасным принимается ток, который при 100 размыканиях не дает ни одного взрыва газовой смеси, но при увеличении на 5% дает одно воспламенение на 100 искрений [Л. 2]. Такой ток обеспечивает вероятность воспламенения $10^{-2} > p > 10^{-3}$.

Нами предложено строить характеристики искробезопасности при более низкой вероятности воспламенения, например при 10^{-5}, а допустимые токи определять введением определенного запаса в зависимости от условий и режима работы испытуемого устройства.

При экспериментальной оценке воспламеняющей способности тока в опытной камере создаются самые опасные условия, что на практике приводит к обеспечению еще бо́льших запасов надежности. В камере создается наиболее легко воспламеняющаяся концентрация взрывчатой смеси, редко достижимая в производственных помещениях, контакты размыкающего устройства выполняются острыми, подбирается оптимальная скорость размыкания, учитывается материал контактов, наконец, все опыты проводятся на постоянном токе.

Для определения вероятности воспламенения, характеризующей зажигающую способность данного искрения при размыкании тока I, необходимо выполнение некоторого числа n опытных искрений во взрывной камере [Л. 1]. Отношение числа наблюдавшихся при этом взрывов m к общему числу искрений n дает статистическую вероятность воспламенения

$$p = \frac{m}{n}.$$

Известно, что чем больше число опытных искрений n, тем точнее определится величина вероятности воспламенения. Вопрос о числе опытов, достаточном для обеспечения необходимой точности, решался на основании рассмотрения (рис. 1) специально строившихся экспериментальных кривых p-p (n) или p-p (m). Признаком достижения необходимой точности считалось уменьшение амплитуды колебаний кривой p-p (m).

Величина возможного отклонения экспериментального результата от истинного значения вероятности воспламенения оценивалась либо расчетом на основании закона больших чисел, либо при помощи таблиц двусторонних доверительных пределов, составленных для оценки вероятности по частоте при биноминальном распределении [Л. 3].

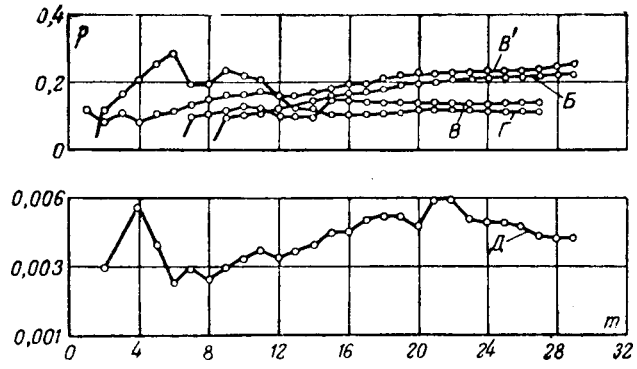


Рис. 1. Зависимость статистической вероятности воспламенения газовоздушных смесей от числа набранных взрывов (m).

Б — пропан, 6%, 24 *в*, 0,022 *гн*, 0,09 *а*, контакты из вольфрама и стали; *В* — ацетон, 7%, 24 *в*, 0,22 *гн*, 0,085 *а*, контакты из вольфрама и стали; *В'* — ацетон, данные те же, ток 0,14 *а*; *Г* — этилен, 7%, 24 *в*, 0,22 *гн*, 0,07 *а*, контакты те же; *Д*—водород, 20%, 60 *в*, 0,022 *гн*, 0,095 *а*, контакты из облуженной латуни.

Так, например, при $m = 30$ и $n = 530$ статистическая вероятность составляла $p = 30/530 = 0{,}0566$, а возможные отклонения вероятности по таблицам 95% доверительных пределов составляли 0,08 ... 0,39 и возможная относительная ошибка: +41% и −31%.

Постоянство m обеспечивало во всех сериях опытов примерно одинаковые относительные отклонения вероятности от частоты. Поэтому в наших опытах всегда соблюдалось постоянство числа взрывов $m = 30$, а число искрений n принималось таким, при котором набиралось это число взрывов.

Исследование было начато с выяснения наиболее легко воспламеняющихся от электрических искр концентраций взрывчатых смесей. С этой целью мы проследили изменения вероятности

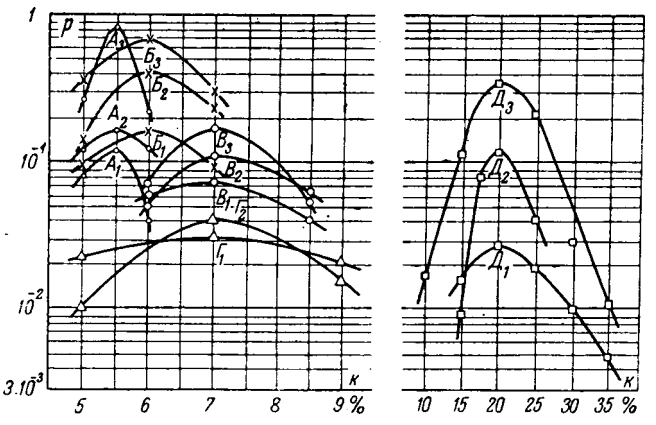


Рис. 2. Зависимость статистической вероятности воспламенения от концентрации паро- или газовоздушной смеси.

Эфир: A_1 — 60 *в*, 0,16 *гн*, 0,10 *а*; A_2 — 24 *в*, 0,155 *гн*, 0,15 *а*; A_3 — 24 *в*, 0,022 *гн*, 0,35 *а*. Пропан: $Б_1$ — 24 *в*, 0,22 *гн*, 0,2 *а*; $Б_2$ — 24 *в*, 0,35 *гн*, 0,15 *а*; $Б_3$ — 24 *в*, 0,22 *гн*, 0,25 *а*. Ацетон: B_1 — 60 *в*, 0,65 *гн*, 0,17 *а*; B_2 — 24 *в*, 0,22 *гн*, 0,17 *а*; B_3 — 24 *в*, 0,22 *гн*, 0,2 *а*. Этилен: $Г_1$—24 *в*, 0,22 *гн*, 0,12 *а*; $Г_2$ — 24 *в*, 0,65 *гн*, 0,11 *а*. Водород: $Д_1$ — 24 *в*, 0,022 *гн*, 0,1 *а*; $Д_2$ — 24 *в*, 0,022 *гн*, 0,15 *а*; $Д_3$ — 60 *в*, 0,16 *гн*, 0,05 *а*.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

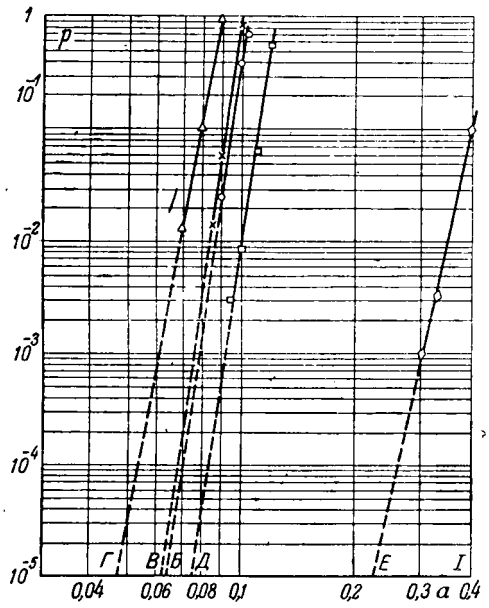


Рис. 3. Зависимость вероятности воспламенения взрывчатых паро- и газовоздушных смесей от размыкаемого тока. *Б* — пропан, 6%, 24 *в*, 0,22 *гн*, контакты из вольфрама и стали; *В* — ацетон, 7%, 24 *в*, 0,22 *гн*, контакты те же; *Г* — этилен, 7%, 24 *в*, 0,22 *гн*, контакты те же; *Д* — водород, 20%, 60 *в*, 0,022 *гн*, контакты из облуженной меди; *Е* — метан, 8,5%, 200 *в*, 0,237 *гн*, контакты из платины и стали.

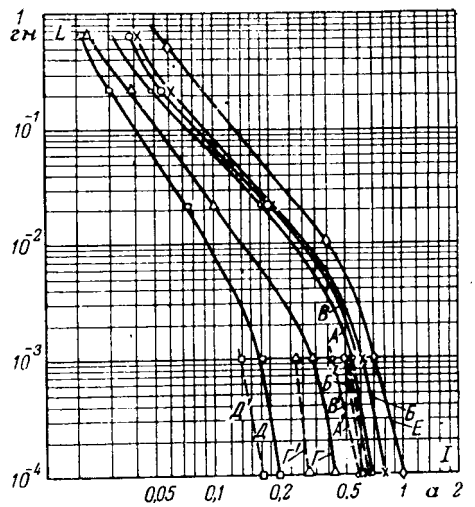


Рис. 4. Экспериментальные характеристики искробезопасности ($p = 10^{-5}$). Напряжение 60 *в*, постоянный ток; паро- и газовоздушные смеси с воздухом при оптимальных концентрациях, давление 740...760 *мм* рт. ст, температура 20° С.

А — эфир, контакты из облуженной латуни; *Б* — пропан, контакты из вольфрама и стали; *В* — ацетон, контакты из вольфрама и стали; *Г* — этилен, контакты те же; *Д*—водород, контакты из облуженной латуни, скорости размыкания 1,25 *м/сек* при 0,01—0,5 *гн* и 0,5 *м/сек* при индуктивности менее 0,001 *гн* (пунктирные линии); *Е* — метан, контакты из платины и стали, скорость размыкания более 1 *м/сек*.

воспламенения в зависимости от изменения концентрации взрывчатых газовых смесей при одних и тех же параметрах искрящей цепи. Затем опыты повторялись при других параметрах искрящей цепи.

Результаты этих исследований приведены на рис. 2, а также в табл. 1, дополненной данными из других источников.

Таблица 1

Наиболее легко воспламеняющиеся от электрических искр концентрации (k) взрывчатых газовоздушных и паровоздушных смесей

Наименование газо-или паровоздушной взрывчатой смеси	Концентрация по объему, %
Водород	20,0
Естественный газ из фонтанных нефтяных скважин[1] (содержание CH_4 96...99%)	10,0
Метан	8,5
Сухой газ пиролиза[1]	8,0
Этан[2]	7,0
Этилен	7,0
Ацетон	7,0
Газ термического крегинга[1]	6,0
Пропан	6,0 (5,0)[2]
Эфир	5,5
Бутан[2]	4,2
Пентан[2]	4,0
Гексан[2]	3,2
Бензин[1] (удельный вес 0,67; T кипения 65° С), *мг/л*	121,0
Бензол[1] (удельный вес 0,9012; T кипения 80,4° С), *мг/л*	216,0

Примечания: 1. Данные по [Л. 4]. Методика определения оптимальной концентрации не указана.

2. Оптимальная концентрация определялась по минимальному току воспламенения [Л. 5].

Дальнейшая задача состояла в определении искробезопасных токов при размыкании электрических цепей с различными параметрами. Исследуемые цепи представляли собой последовательные соединения различных индуктивностей с источником постоянного тока в виде аккумуляторной батареи, регулировочным реостатом и искропроизводящим устройством в камере.

Вначале определялась вероятность воспламенения p_1, соответствующая произвольно установленным параметрам цепи при токе I_1. Затем при помощи реостата ток понижался до I_2 и устанавливалась меньшая вероятность воспламенения p_2. Напряжение и индуктивность цепи при этом сохранялись без изменения.

На основании известной вероятностной закономерности [Л. 1], согласно которой $p = p(I)$ в логарифмической сетке — прямая, и полученных двух или более точек p_1, I_1; p_2, I_2 и т. д. строились вероятные прямые для каждой исследуемой электрической цепи (рис. 3). Затем графически, путем продолжения вероятных линий (рис. 3) или расчетным путем, по тангенсу угла наклона этих линий определялись токи, соответствующие вероятности воспламенения 10^{-5}.

Фактически при токах, соответствующих вероятности воспламенения 10^{-5}, нам не удавалось добиться взрыва при выполнении большого количества искрений. Поэтому установленная указанным способом вероятность воспламенения 10^{-5} в дальнейшем называется условной. Определенные таким образом токи, соответствующие условной вероятности воспламенения 10^{-5}, приведены на характеристиках искробезопасности (рис. 4, 5, 6) для напряжений 60, 24 и 6 *в*. В табл. 2 даны мощности, соответствующие этим токам.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Таблица 2

Индуктивность, *гн*	Напряжение, *в*	Минимальные значения[1] воспламеняющих мощностей (*вт*) и токов (*а*) в газо-и паровоздушных смесях при условной вероятности воспламенения $p = 10^{-5}$					
		Водородо-воздушная	Этилено-воздушная	Эфиро-воздушная	Ацетоно-воздушная	Пропано-воздушная	Метано-воздушная
0,0001	6	2,4; 0,4	4,5; 0,75	—	—	—	—
	24	7,2; 0,3	18,0; 0,68	31,0; 1,3	33,5; 1,4	41,0; 1,7	—
	60	10,8; 0,18	19,5; 0,33	36,0; 0,6	37,0; 0,62	38,5; 0,63	60,0; 1,0
0,001	6	1,3; 0,22	3,0; 0,5	—	—	6,0; 1,0	—
	24	4,3; 0,18	10,8; 0,45	19,0; 0,8	20,4; 0,85	22,5; 0,95	38,5; 1,6
	60	8,4; 0,14	16,0; 0,27	29,0; 0,48	29,4; 0,49	30,5; 0,51	42,0; 0,7
0,01	6	0,66; 0,11	1,0; 0,18	—	—	2,15; 0,36	—
	24	2,4; 0,1	3,85; 0,16	7,2; 0,3	7,9; 0,33	8,9; 0,37	10,0; 0,42
	60	5,4; 0,09	7,8; 0,13	14,4; 0,24	15,5; 0,26	16,8; 0,28	24,0; 0,4
0,1	6	0,3; 0,05	0,37; 0,063	—	0,6; 0,1	0,66; 0,11	—
	24	1,0; 0,045	1,45; 0,06	1,95; 0,082	2,15; 0,09	2,3; 0,095	2,75; 0,115
	60	2,4; 0,04	3,0; 0,05	4,2; 0,07	4,8; 0,08	5,4; 0,09	7,8; 0,13
0,5	6	0,168; 0,028	0,19; 0,032	—	—	—	—
	24	0,6; 0,025	0,72; 0,03	0,9; 0,038	—	—	1,3; 0,05
	60	1,3; 0,022	1,5; 0,025	1,9; 0,032	2,4; 0,04	2,45; 0,041	3,6; 0,06

[1] Слева от точки с запятой даны значения мощностей, а справа — токи.
[2] Мощности и токи даны для быстрого размыкания при индуктивностях от 0,01 до 0,5 *гн* и для медленного размыкания (исключая метан) при индуктивностях от 0,0001 до 0,001 *гн*.

Искропроизводящее устройство было выполнено в виде вертикальной иглы и заостренной пружинящей пластинки, соскакивающей с иглы [Л. 1]. Принятый способ размыкания обеспечивал воспламенение взрывчатых газовых смесей при токах, в 1,5 ... 1,9 раза меньших, чем в способе МакНИИ [Л. 6], когда размыкание осуществляется между двумя облуженными проволочками диаметром 0,25 *мм*. Материалом контактов в опытах с водородовоздушными и эфировоздушными смесями была облуженная латунь. В опытах с этиленом, ацетоном и пропаном контакты изготавливались из стали (пластинка) и вольфрама (игла). Условия, в которых оценивалась воспламеняемость метана, приведены в [Л. 1].

Опыты с этиленовоздушной смесью показали, что воспламеняющие токи при контактах из облуженной латуни получаются в 1,3 раза меньшими, чем при контактах из стали и вольфрама. Указанное понижение токов, связанное с переходом на контакты из менее тугоплавких металлов, необходимо учитывать в расчетах искробезопасных цепей.

Скорость размыкания принималась: для индуктивных цепей 1,25 *м/сек* и для безреактивных цепей (или цепей с малой индуктивностью) 0,5 *см/сек*, тем самым обеспечивались условия для получения минимальных значений воспламеняющих токов.

Все опыты проводились при температуре 20° С и атмосферном давлении 740 ... 760 *мм* рт. ст.

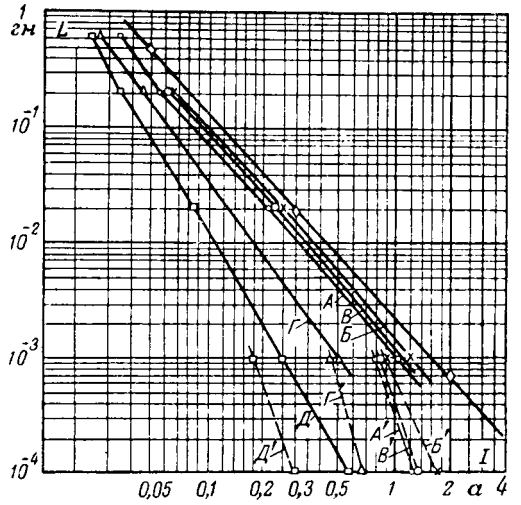


Рис. 5. Экспериментальные характеристики искробезопасности ($p = 10^{-5}$). Напряжение 24 *в*, постоянный ток (обозначения см. на рис. 4).

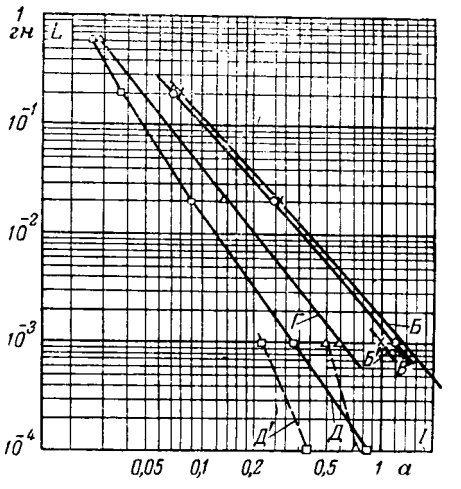


Рис. 6. Экспериментальные характеристики искробезопасности ($p = 10^{-5}$). Напряжение 6 *в*, постоянный ток (обозначения см. на рис. 4).

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Рассмотрение данных табл. 2 показывает, что наибольший практический интерес представляют безреактивные цепи, допускающие безопасную передачу мощностей от 2 до 60 *вт* в зависимости от состава газовой смеси.

Применение искрогасящих шунтов в виде селеновых или германиевых диодов и короткозамкнутых витков приближает индуктивные цепи по воспламеняющей способности к практически безреактивным цепям ($L = 0{,}001 \ldots 0{,}0001$ *гн*), для которых искробезопасные мощности (*вт*), как видно из табл. 2, а также из [Л. 4], составляют [1]:

смесь	мощность, *вт*
водородовоздушная	2,4 ... 10,8
этиленовоздушная	4,5 ... 19,5
эфировоздушная	до 36
ацетоновоздушная	до 37
пропановоздушная	до 38
метановоздушная	до 60
смеси паров бензина, бензола, естественного газа, газа термического крекинга с воздухом[1]	до 35
смесь сухого газа пиролиза с воздухом[1]	до 27

Приведенные данные позволяют сделать важный практический вывод: область искробезопасных токов и мощностей для перечисленных газо- и паровоздушных смесей лежит в пределах, приемлемых для выполнения ряда технических устройств малой мощности — автоматизации, связи, сигнализации и дистанционного управления — даже при условии введения двукратного запаса надежности.

Этот вывод имеет большое практическое значение, поскольку он открывает новые области безопасного применения электрической энергии в тех производственных условиях, где раньше использование электричества осложнялось применением тяжелых бронированных оболочек или вообще считалось недопустимым. Следует подчеркнуть, что в этих условиях искробезопасные цепи смогут найти применение не только как средство сигнализации, связи, дистанционного управления, но и как безопасные вспомогательные цепи для обеспечения взрывозащиты сильноточных устройств (в схемах опережающего отключения, блокировок и в системах автоматической газовой защиты при помощи газовых реле).

Таким образом, полученные данные открывают новые возможности для внедрения средств автоматизации и телемеханики во взрывоопасные производственные помещения химической, нефтяной, нефтеперерабатывающей, лакокрасочной и других отраслей промышленности и представляют несомненный технический интерес.

[1] Данные [Л. 4] приведены при коэффициенте запаса 2,5.

Литература

1. В. С. Кравченко. Открытое электрическое искрение в воспламеняющейся рудничной атмосфере. Электричество, № 2, 1950.

2. G. Allsop, F. J. Hartwell, E. M. Guenault, A. R. Baker. Safety in Mines Research, № 106, 1947.

3. И. В. Дунин-Барковский и Н. В. Смирнов. Теория вероятностей и математическая статистика в технике, 1955.

4. Р. Н. Енгибарова и С. М. Вольпе. Воспламенение взрывчатых смесей паров нефтепродуктов и нефтяных газов с воздухом от электрической искры размыкания. Труды Всесоюзного научно-исследовательского института по технике безопасности МНП СССР, вып. VIII, 1955.

5. Д. Морган. Принципы зажигания. Машгиз, 1947.

6. П. Ф. Ковалева. Принципы взрывобезопасности рудничного электрооборудования. Углетехиздат, 1951.

[30.5.1956]

✧ ✧ ✧

Термосопротивление как датчик температуры в схеме с логометром

Кандидат техн. наук **Г. К. НЕЧАЕВ**

Институт электротехники Академии наук Украинской ССР

В устройствах измерения температуры весьма широко распространены логометры, используемые в качестве измерительных приборов, благодаря независимости их показаний от колебания напряжения питания схемы. Обычно в качестве датчиков таких устройств применяются проволочные термометры сопротивления, которым присущ ряд схемных и эксплуатационных недостатков. В последнее время в качестве датчиков температуры находят применение термосопротивления [Л. 1, 2, 3, 4 и 5] благодаря некоторым их положительным свойствам: высокому температурному коэффициенту сопротивления; значительному омическому сопротивлению; малым габаритам.

Нами ставится задача сочетания термосопротивления с логометром промышленного производства без существенных переделок самого логометра.

Одна из типичных схем логометра, например типа ЛПБ, представлена на рис. 1. Значения сопротивлений моста указываются в описании прибора или непосредственно на сопротивлениях. Согласно описанию плечо r_2 является термометром сопротивления. Его сопротивление задается для нижней и верхней границ измеряемого диапазона температур. Если границы диапазона Θ_1 и Θ_2, то сопротивление соответственно будет r_{21} и r_{22}. Изменение сопротивления термодатчика в заданном диапазоне температур можно характеризовать кратностью изменения его сопротивления

$$k = \frac{r_{22}}{r_{21}} > 1.$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

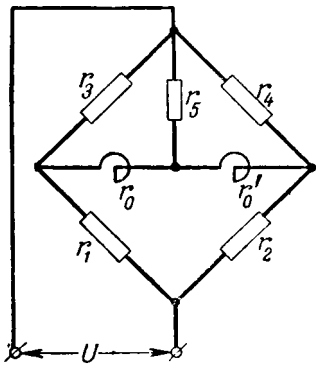


Рис. 1.

Для этих же условий кратность изменения термосопротивления будет значительно больше, так как температурный коэффициент α_t почти в 10 раз больше, чем меди.

Необходимо учесть, что для термосопротивления $\alpha_t < 0$ и с ростом температуры значение термосопротивления падает. Поэтому, для того чтобы шкала логометра писалась слева направо, необходимо термосопротивление включить в плечо r_1, сделав плечо r_2 постоянным.

Очевидно, что для обеспечения полного отклонения стрелки логометра плечо r_1, содержащее термосопротивление, в одном и том же диапазоне температуры должно иметь ту же кратность изменения сопротивления, что и проволочный термометр. Это условие можно выполнить, включив параллельно и последовательно с термосопротивлением добавочные температуростабильные сопротивления. Можно предложить два вида соединений термосопротивления и добавочных сопротивлений, которые практически равноценны (рис. 2,*а* и *б*).

Рассмотрим случай, соответствующий рис. 2,*а*. Допустим, что в заданном диапазоне температур сопротивление плеча, содержащее термосопротивление, изменяется от R'_{t1} до R'_{t2} при кратности изменения сопротивления $k = \frac{R'_{t1}}{R'_{t2}} = \frac{r_{22}}{r_{21}}$, равной кратности проволочного термометра сопротивления, предназначенного для логометра. В общем случае

$$R'_{t1} \neq r_{22} \text{ и } R'_{t2} \neq r_{21}.$$

Разные индексы в этих неравенствах объясняются противоположными знаками температурного коэффициента полупроводниковых и металлических сопротивлений.

Пусть для температур Θ_1 и Θ_2, соответствующих границам температурного диапазона, термосопротивление принимает значения R_{t1} и R_{t2} (рис. 3).

Тогда согласно предыдущему

$$R'_{t1} = \frac{R_{t1}\rho_1}{R_{t1} + \rho_1} + \rho_2; \qquad (1)$$

$$R'_{t2} = \frac{R_{t2}\rho_1}{R_{t2} + \rho_1} + \rho_2. \qquad (2)$$

Обозначив

$$\Delta R = R'_{t1} - R'_{t2}$$
$$\Delta R_t = R_{t1} - R_{t2},$$

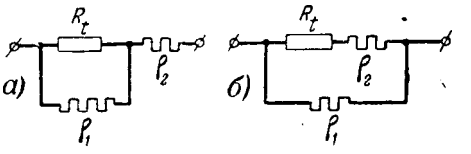


Рис. 2.

из выражения (1) и (2) получим:

$$\rho_1 = \frac{R_{t1} + R_{t2} + \Delta R_t \sqrt{1 + \frac{4R_{t1}R_{t2}}{\Delta R_t \Delta R}}}{2\left(\frac{\Delta R_t}{\Delta R} - 1\right)}; \qquad (3)$$

$$\rho_2 = \frac{1}{2}\left[R'_{t1} + R'_{t2} - \Delta R \sqrt{1 + \frac{4R_{t1}R_{t2}}{\Delta R_t \Delta R}}\right]. \qquad (4)$$

Из рассмотрения формулы (4) можем заключить, что имеются определенные пограничные значения R'_{t1} и R'_{t2}, позволяющие выполнить схему при данных параметрах термосопротивления. Очевидно, что

$$\frac{R'_{t1} + R'_{t2}}{\Delta R} \geqslant \sqrt{1 + \frac{4R_{t1}R_{t2}}{\Delta R \Delta R_t}}. \qquad (5)$$

Обозначив $\frac{1}{R_{t2}} - \frac{1}{R_{t1}} = \Delta\sigma_t$ и учитывая, что $\frac{R'_{t1}}{R'_{t2}} = k$, преобразуем формулу (5) к виду:

$$\frac{1}{k-1} \geqslant \frac{1}{R'_{t1}\Delta\sigma_t}. \qquad (6)$$

Очевидно, минимально возможное значение сопротивления плеча R'_{t1}

$$R'_{t1м} \geqslant \frac{k-1}{\Delta\sigma_t}, \qquad (7)$$

Таким же путем можно найти добавочные сопротивления ρ_1 и ρ_2 для схемы рис. 2,*б*. Сопротивления плеча логометра с термосопротивле-

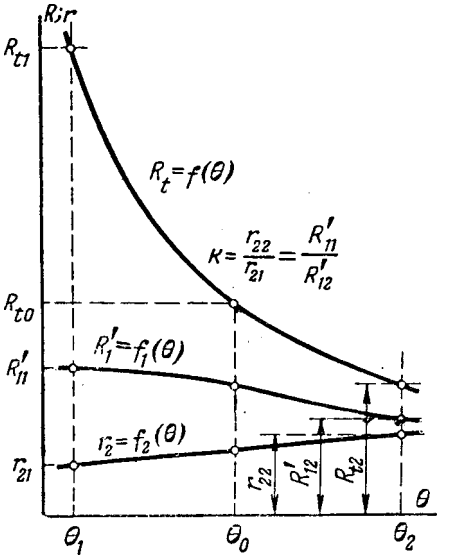


Рис. 3.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

нием на границах температурного диапазона соответственно Θ_1 и Θ_2 будут:

$$R'_{11} = \frac{(R_{t1} + \rho_2)\rho_1}{R_{t1} + \rho_1 + \rho_2}; \quad (8)$$

$$R'_{12} = \frac{(R_{t2} + \rho_2)\rho_1}{R_{t2} + \rho_1 + \rho_2}. \quad (9)$$

Из этих выражений получим:

$$\rho_2 = \frac{1}{2}\left[\Delta R_t \sqrt{1 + 4\frac{R'_{11}R'_{12}}{\Delta R\,\Delta R_t}} - (R_{t1} + R_{t2})\right], \quad (10)$$

где ΔR и ΔR_t соответствуют ранее принятым обозначениям.

Анализируя соотношение (10), можно заключить, что и в этом случае имеются определенные пограничные значения R'_{11} и R'_{12}, допускающие выполнение схемы при определенных параметрах термосопротивления. ρ_2 будет положительным, если

$$\frac{1}{k-1} \geqslant \frac{1}{\Delta\sigma_t R'_{11}}. \quad (11)$$

Очевидно, неравенство (11) полностью соответствует (6), что подтверждает равноценность схем рис. 2.

Если мы имеем устройство с переключателем для измерения температуры ряда точек, то следует выбрать минимальное значение $\Delta\sigma_t$ из всей группы термосопротивлений. Очевидно, что для каждого термосопротивления ρ_1 и ρ_2 будут иметь свои значения.

Если по расчету $R'_{11м} \leqslant r_{22}$, то берем:

$$R'_{11} = r_{22} \text{ и } R'_{12} = r_{21}.$$

Если же $R'_{11м} > r_{22}$ и $\frac{R'_{11м}}{r_{22}} = p$, то $R'_{12} = pr_{21}$. В этом случае все постоянные сопротивления плеч моста и напряжение питания схемы увеличиваются в p раз.

При таком методе расчета дополнительных сопротивлений ρ_1 и ρ_2 шкала прибора может получиться весьма неравномерной и ее средняя точка не будет совпадать со средним значением температурного диапазона, что в некоторых случаях нежелательно.

Рассмотрим расчет схемы, исходя из условия совпадения среднего значения измеряемого диапазона температур со срединой шкалы логомера. Очевидно, среднее значение диапазона температур от Θ_1 до Θ_2 будут $\Theta_0 = \frac{\Theta_1 + \Theta_2}{2}$. Тогда трем указанным температурам будут соответствовать значения термосопротивления R_{t1}, R_{t2} и R_{t0} (рис. 3). Из условия задачи необходимо иметь такие добавочные сопротивления ρ_1 и ρ_2, чтобы выполнялись условия

$$R'_{10} = \frac{R'_{11} + R'_{12}}{2} \text{ и } \frac{R'_{11}}{R'_{12}} = k. \quad (12)$$

Очевидно, что для схемы рис. 2,*а* дополнительно к выражениям (1) и (2) можно написать следующее:

$$R'_{10} = \frac{R_{t0}\cdot\rho_1}{R_{t0} + \rho_1} + \rho_2. \quad (13)$$

Решив совместно (1), (2), (8) и (9), получим:

$$\rho_1 = \frac{(R_{t1} + R_{t2})R_{t0} - 2R_{t1}R_{t2}}{R_{t1} + R_{t2} - 2R_{t0}}; \quad (14)$$

$$\rho_2 = \frac{\rho_1}{k-1}\left(\frac{R_{t1}}{R_{t1} + \rho_1} - k\frac{R_{t2}}{R_{t2} + \rho_1}\right). \quad (15)$$

Значение R'_{11} и R'_{12} определим, подставив полученные ρ_1 и ρ_2 в уравнения (1) и (2).

Как и в предыдущем случае, сопротивления плеч моста и напряжение питания схемы увеличиваются в p раз.

Последним вопросом является определение параметров необходимого термосопротивления. Задача может быть решена из условия независимости показаний логометра от сопротивления подводящей линии к термодатчику. Предположим, что сопротивление линии к наиболее удаленному термодатчику будет $r_л$. Следовательно, увеличение значения термосопротивления на $r_л$ не должно вызывать погрешность измерения, превосходящую некоторое значение $\varepsilon_л$. Наибольшая погрешность будет в точке, соответствующей верхней границе измерения тогда, когда термосопротивление имеет наименьшее значение. Тогда ориентировочное значение

$$R_{t2} = \frac{r_л}{\varepsilon_л\%}\cdot 100. \quad (16)$$

Выбрав ближайшее подходящее термосопротивление, по его характеристике определим все интересующие нас параметры. Очевидно, погрешности, связанные с температурными изменениями сопротивления линии, в данном случае будут практически неощутимы.

Рассчитав все элементы схемы, следует проверить, чтобы ток в термосопротивлении не превышал максимально допустимого значения. Максимальное значение тока соответствует верхнему значению температурного диапазона и его можно определить по приближенной формуле:

$$I_{t\,макс} \approx \frac{U\rho_1}{(R_{t2} + \rho_1)\left(r_3 + \frac{R_{t2}\rho_1}{R_{t2} + \rho_1} + \rho_2\right)}. \quad (17)$$

Пример 1. Рассчитать схему измерения температуры с логометром типа ЛПБ. Температурный диапазон от 0 до 120° С. Сопротивление наиболее длинной линии к термодатчику $r_л = 1$ *ом*. Допустимые погрешности, обусловленные различными сопротивлениями подводящих линий $\varepsilon_л = 0{,}5\%$. Сопротивление медного датчика к логометру $r_0 = 53$ *ом* и $r_{120} = 80$ *ом*. Сопротивление стандартной линии с подгоночным сопротивлением $R_л = 5$ *ом*.

Определить параметры необходимых термосопротивлений, добавочных сопротивлений, плеч моста и напряжение питания схемы.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Ориентировочное значение термосопротивления

$$R_{t2} = \frac{r_л}{\varepsilon_л\%}100 = \frac{1\cdot100}{0,5}\cdot100 = 200 \text{ ом}.$$

Выбираем термосопротивление $R_{120} = 202$ ом, $R_0 = 1\,770$ ом, $\Delta\sigma_t = 4,385\cdot10^{-3}$. С учетом сопротивления линии кратность изменения сопротивления медного термодатчика

$$k = \frac{85}{58} = 1,465.$$

Минимально возможное сопротивление плеча моста с термосопротивлением, соответствующее 0° С:

$$R'_{11м} = \frac{k-1}{\Delta\sigma_t} = \frac{1,465-1}{4,385\cdot10^{-3}} = 106 \text{ ом}.$$

Сопротивление плеча, соответствующее 120° С:

$$R'_{12} = \frac{106}{1,465} = 72,5 \text{ ом};$$

$$\Delta R = 106 - 72,5 = 33,5 \text{ ом}.$$

Добавочные сопротивления к термосопротивлению

$$\rho_1 = \frac{R_{t1} + R_{t2} + \Delta R_t\sqrt{1+\frac{4R_{t1}R_{t2}}{\Delta R\Delta R_t}}}{2\left(\frac{\Delta R_t}{\Delta R}-1\right)} =$$

$$= \frac{1\,770 + 202 + 1\,568\sqrt{1+\frac{4\cdot1\,770\cdot202}{1\,568\cdot33,5}}}{2\left(\frac{1\,568}{33,5}-1\right)} = 112,2 \text{ ом};$$

$$\rho_2 = \frac{1}{2}\left[R'_{11} + R'_{12} - \Delta R\sqrt{1+\frac{4R_{t1}R_{t2}}{\Delta R\Delta R_t}}\right] =$$

$$= \frac{1}{2}106 + 72,5 - 33,5\sqrt{1+\frac{4\cdot1\,770\cdot202}{1\,568\cdot33,5}} = 0,25 \text{ ом}.$$

Определяем коэффициент p:

$$p = \frac{R'_{11}}{r_{12}} = \frac{106}{85} = 1,25.$$

Следовательно, сопротивления плеч моста и напряжение питания схемы должны быть увеличены в 1,25 раза по сравнению с заводскими данными.

Рассчитаем добавочные сопротивления из условия, чтобы середина шкалы прибора соответствовала средней точке измеряемого диапазона температур.

Согласно характеристике термосопротивления $R_{60} = 509$ ом. Тогда

$$\rho_1 = \frac{(R_{t1}+R_{t2})R_{t0} - 2R_{t1}R_{t2}}{R_{t1}+R_{t2}-2R_{t0}} =$$

$$= \frac{(1\,770+202)509 - 2\cdot1\,770\cdot202}{1\,770+202-2\,509} = 301 \text{ ом};$$

$$\rho_2 = \frac{\rho_1}{k-1}\left(\frac{R_{t1}}{R_{t1}+\rho_1} - k\frac{R_{t2}}{R_{t2}+\rho_1}\right) =$$

$$= \frac{301}{1,465-1}\left(\frac{1\,770}{1\,770+301} - 1,465\frac{202}{202+301}\right) = 188 \text{ ом}.$$

При этом

$$R'_{11} = \frac{1\,770\cdot301}{1\,770+301} + 188 = 453 \text{ ом};$$

$$R'_{10} = \frac{509\cdot301}{509+301} + 188 = 381 \text{ ом};$$

$$R'_{12} = \frac{202\cdot301}{202+301} + 188 = 309 \text{ ом}.$$

Коэффициент

$$p = \frac{R'_{11}}{r_{22}} = \frac{453}{85} = 5,33.$$

В этом случае сопротивление плеч моста и напряжение питания схемы должны быть увеличены в 5,33 раза по сравнению с заводскими данными.

Литература

1. Б. Т. Коломиец и И. Т. Шефтель. Измерение температур полупроводниковыми термометрами сопротивления. ЖТФ, т. XIII, вып. 10, октябрь 1947.

2. Б. С. Сотсков. Термисторы и применение их в схемах. Автоматика и телемеханика, № 1, 1948.

3. М. А. Каганов. Основы электрического расчета приборов для измерения температуры при помощи термисторов. Автоматика и телемеханика, № 1, 1952.

4. Г. К. Нечаев. К вопросу о применении термосопротивлений для измерения температуры. ДАН, т. XCVI, № 1, 1954.

5. Г. К. Нечаев. Анализ и расчет мостовой схемы с термосопротивлением для измерения температуры. Сборник трудов Института электротехники АН УССР, № 12, 1954.

[19.4.1956]

Угол сдвига фаз в индукционной бессердечниковой электропечи

Инж. Г. С. ВАЙНБЕРГ
Москва

При конструировании индукционной бессердечниковой электропечи выбор размеров индуктора и загрузки, как правило, производится на основе опытных данных.

В литературе [Л. 1, 2 и др.] приводятся рекомендуемые отношения диаметра к высоте индуктора и диаметра к высоте загрузки, на основании которых и выбираются геометрические размеры индуктора и загрузки.

Омическое и индуктивное сопротивления индукционной печи и электрические потери в индукторе зависят от размеров индуктора и загрузки.

В приведенной ранее работе [Л. 3] рассматривался вопрос об изменении электрических потерь, а следовательно, и электрического к. п. д. индукционной печи в зависимости от изменения размеров индуктора и загрузки. По рекомендациям, приведенным в этой работе, можно осуществить индукционную бессердечниковую электропечь заданной емкости с максимально возможным электрическим к. п. д., который может быть достигнут при изменении размеров индуктора и загрузки.

Однако наибольший электрический к. п. д. печи не означает, что в сети, питающей электропечь, и контурных конденсаторах, при этом достигнуты минимальные электрические потери, так как cos φ индукционной бессердечниковой печи изменяется в зависимости от геометрических размеров индуктора и загрузки не так, как изменяется ее электрический к. п. д.

Ниже рассматривается количественная зависимость между углом сдвига фаз и размерами индуктора и загрузки; применительно к сталепла-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

вильным бессердечниковым печам емкостью 10, 40, 80, 160 *л* (от 75 до 1 200 *кг* стали) приводятся кривые изменения угла сдвига фаз в зависимости от размеров печей.

Сдвиг фаз в загрузке печи. В плавильных индукционных бессердечниковых электропечах при нагреве сильно изменяется активное сопротивление загрузки, а при плавке магнитных материалов изменяется также и магнитная проницаемость, которая достигает значения, равного единице при расплавлении. Ниже принимается омическое сопротивление загрузки после того, как оно устанавливается, т. е. после расплавления.

При допущении равномерного распределения тока по высоте сопротивление загрузки приближенно можно определить по формуле

$$R_2 = \frac{\pi d \sqrt{\rho_2 f}}{5\,030 h} \ [ом], \qquad (1)$$

где $d = d_1 - z$ — диаметр загрузки, уменьшенный на глубину проникновения тока в загрузке, *см*;
h — высота загрузки, *см*;
ρ_2 — удельное сопротивление материала загрузки, *ом/см*^{3};
f — частота тока.

Индуктивность загрузки определяется по формуле [Л. 2]:

$$L_2 = 0{,}5 d F\left(\frac{d}{h}\right) 10^{-9} \ [гн], \qquad (2)$$

где $F\left(\frac{d}{h}\right)$ — функция, определяемая по таблицам [Л. 2].

Глубина проникновения тока [Л. 1 и 2]

$$z = 5\,030 \sqrt{\frac{\rho_2}{f}} \ [ом]. \qquad (3)$$

Определим отношение омического сопротивления к индуктивному, т. е. котангенс угла сдвига фаз в загрузке:

$$\operatorname{ctg} \varphi_з = \frac{R_2}{x_2} = \frac{10^5}{0{,}5 h F\left(\frac{d}{h}\right)} \sqrt{\frac{\rho_2}{f}}. \qquad (4)$$

Подставляя в (4) значение глубины проникновения тока из (3) и высоту загрузки

$$h = 1{,}085 \left(\frac{h}{d}\right)^{2/3} V^{1/3} \ [см],$$

получим:

$$\operatorname{ctg} \varphi_з = \frac{36{,}4 z \left(\frac{d}{h}\right)^{2/3}}{V^{1/3} F\left(\frac{d}{h}\right)} = \frac{zB}{V^{1/3}}. \qquad (5)$$

Из выражения (5) видно, что для одного и того же объема загрузки и глубины проникновения тока $\operatorname{ctg} \varphi_з$ изменяется только в зависимости от $\frac{d}{h}$.

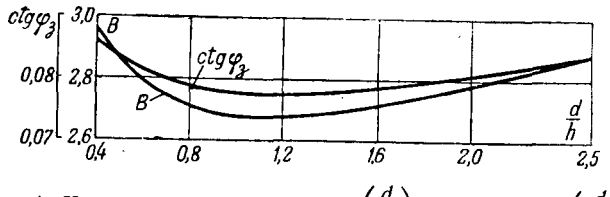


Рис. 1. Кривые изменения $B = f\left(\frac{d}{h}\right)$ и $\operatorname{ctg} \varphi_з = f\left(\frac{d}{h}\right)$ для загрузки объемом 40 *л* расплавленной стали и глубины проникновения тока 1 *см*.

Характер этого изменения приведен на рис. 1, где даны значения величины B, зависящей только от отношения $\frac{d}{h}$.

На рис. 1 в качестве примера также приведены значения $\operatorname{ctg} \varphi_з$ для загрузки объемом 40 *л* расплавленной стали и глубины проникновения тока 1 *см*.

Изменение $\operatorname{ctg} \varphi_з$ для обычно применяемых отношений $\frac{d}{h}$ от 0,7 до 1,0 небольшое. Величина B колеблется от 2,67 до 2,73.

Для геометрически подобных загрузок увеличение объема приводит к увеличению угла сдвига фаз.

Определим, как должна изменяться частота тока для того, чтобы, несмотря на увеличение объема загрузки, угол сдвига фаз сохранился неизменным.

Из (3) и (5) получаем:

$$f = \frac{(5\,030B)^2 \rho_2}{(\operatorname{ctg} \varphi_з)^2 V^{2/3}} = \frac{\text{const}}{V^{2/3}}. \qquad (6)$$

Как и следовало ожидать, зависимость частоты от размера загрузки получилась такой же, как и приводимые в литературе выражения для минимальной частоты [Л. 4]:

$$f = m \frac{\rho_2 10^8}{d^2},$$

где m — коэффициент, имеющий различные значения у разных авторов в пределах примерно 10 . . . 40.

Из выражения (5) также видно, что при неизменном объеме загрузки угол сдвига фаз уменьшается или $\operatorname{ctg} \varphi_з$ растет при увеличении глубины проникновения тока, что достигается снижением частоты.

Однако подобное увеличение $\operatorname{ctg} \varphi_з$ можно допустить только до определенного значения отношения диаметра загрузки к глубине проникновения тока, которое рекомендуется иметь для обычных индукционных электропечей не менее 6 . . . 8 [Л. 4].

При уменьшении этого отношения начинается снижение к. п. д. индукционного нагрева, а при увеличении — к. п. д. можно считать практически неизменным.

При условии, что диаметр загрузки значительно больше глубины проникновения тока, что обычно бывает в индукционных электропечах, можно пренебречь разницей между d_1 и d и получить из выражения (5) приближенное значение:

$$\operatorname{ctg} \varphi_з \approx \frac{39{,}5 z \left(\frac{d}{h}\right)}{dF\left(\frac{d}{h}\right)}. \qquad (5а)$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Сдвиг фаз индукционной бессердечниковой печи. Омическое сопротивление однослойного индуктора из витков, охлаждаемых водой, со стенкой, которая имеет толщину, большую, чем глубина проникновения тока z_1 в материале индуктора, может быть приближенно определено по формуле [Л. 3]

$$R_1 = \frac{\pi D \sqrt{\rho_1 f}}{5\,030 H} \cdot \frac{n^2}{k} \text{ [ом]}; \qquad (7)$$

индуктивность индуктора по формуле [Л. 2]

$$L_1 = 0{,}5 D F \left(\frac{D}{H}\right) n^2 10^{-9} \text{ [гн]}, \qquad (8)$$

где D — внутренний диаметр индуктора, *см*;
H — высота индуктора, *см*;
ρ_1 — удельное сопротивление материала индуктора, *ом/см*^{3}
n — число витков индуктора;
$F\left(\frac{D}{H}\right)$ — функция, определяемая по таблицам [Л. 2];
k — коэффициент, меньший единицы, учитывающий неполное заполнение витками высоты и геометрические размеры витков индуктора.

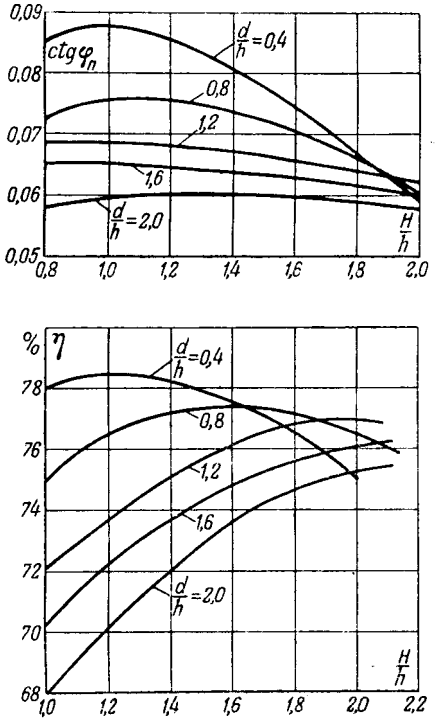


Рис. 2. Кривые изменения $\operatorname{ctg}\varphi_n = f\left(\frac{H}{h}\right)$ и $\eta = f\left(\frac{H}{h}\right)$ для печи с объемом загрузки $V = 10$ *л*.

$\frac{d}{h}$	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0
h	43	27,2	20,7	17,1	14,7
d	17,2	21,8	24,8	27,3	29,4
D	27,6	33,2	36,7	39,7	42,2

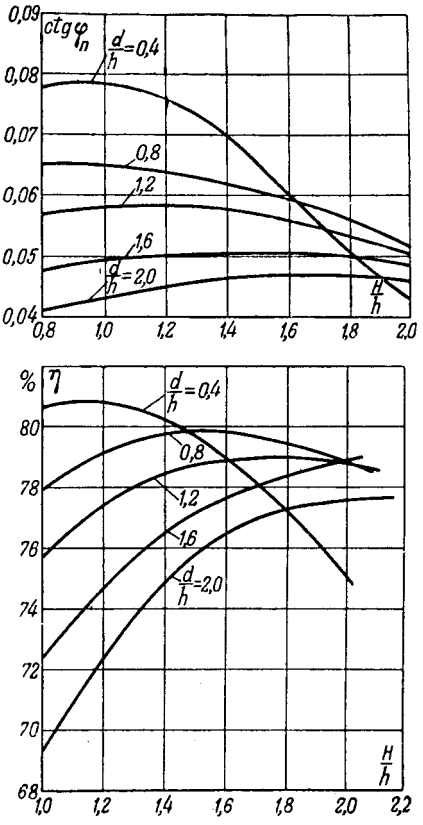


Рис. 3. Кривые изменения $\operatorname{ctg}\varphi_n = f\left(\frac{H}{h}\right)$ и $\eta = f\left(\frac{H}{h}\right)$ для печи с объемом загрузки $V = 40$ *л*.

$\frac{d}{h}$	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0
h	68,0	43,0	32,8	27,0	23,3
d	27,2	34,4	39,4	43,2	46,6
D	39,5	48,0	52,8	58,5	62,6

Эквивалентные сопротивления индукционной печи как индуктивно связанной системы, состоящей из индуктора и загрузки, определяются по формулам [Л. 2]:

$$R_э = R_1 + A^2 R_2; \qquad (9)$$

$$x_э = x_1 - A^2 x_2 = \omega (L_1 - A^2 L_2), \qquad (10)$$

где A^2 — коэффициент трансформации;
$R_э$ и $x_э$ — эквивалентные омическое и индуктивное сопротивления печи.

Определим отношение омического сопротивления к индуктивному или котангенс угла сдвига фаз индукционной печи из (9) и (10):

$$\operatorname{ctg}\varphi_n = \frac{R_э}{x_э} = \frac{R_2}{x_2} \cdot \frac{\frac{R_1}{A^2 R_2} + 1}{\frac{x_1}{A^2 x_2} - 1}. \qquad (11)$$

Как известно, электрический к. п. д. печи равен:

$$\eta = \frac{A^2 R_2}{R_1 + A^2 R_2},$$

откуда

$$\frac{R_1}{A^2 R_2} = \frac{1 - \eta}{\eta}. \qquad (12)$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

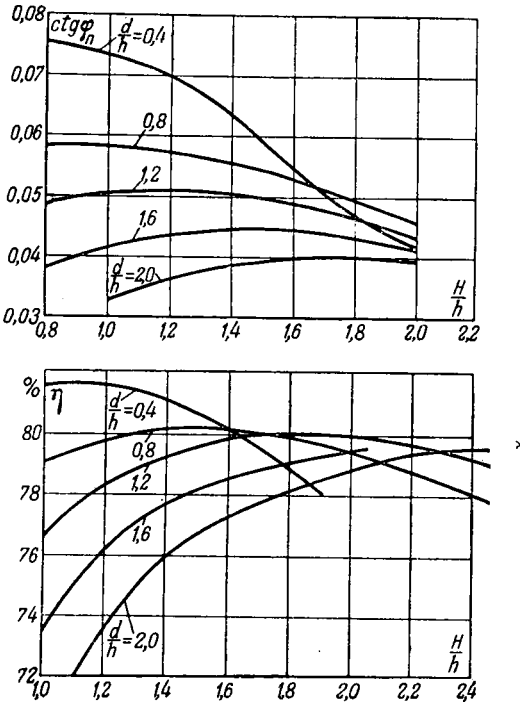


Рис. 4. Кривые изменения $\operatorname{ctg}\varphi_n = f\left(\frac{H}{h}\right)$ и $\eta = f\left(\frac{H}{h}\right)$ для печи с объемом загрузки $V = 80$ *л*.

$\frac{d}{h}$	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0
h	85,5	54,0	41,2	33,9	29,2
d	33,9	43,3	49,5	54,2	58,4
D	40,4	58,6	65,0	71,7	76,5

Из (1), (2), (7) и (8) определим вспомогательную величину

$$C_1 = \frac{x_1}{R_1}\frac{R_2}{x_2} = \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}\frac{H}{h}\cdot\frac{F\left(\frac{D}{H}\right)}{F\left(\frac{d}{h}\right)}}\,k. \qquad (13)$$

Из (12) и (13) получаем:

$$\frac{x_1}{A^2 x_2} = C_1\frac{1-\eta}{\eta}. \qquad (14)$$

Подставив (12)...(14) в (11), получим:

$$\operatorname{ctg}\varphi_n = \frac{R_2}{x_2}\frac{1}{C_1(1-\eta)-\eta} = C_2\operatorname{ctg}\varphi_3, \qquad (15)$$

где C_2 — вспомогательная величина, или, подставляя все значения, имеем:

$$\operatorname{ctg}\varphi_n = \frac{36{,}4z\left(\frac{d}{h}\right)^{2/3}}{V^{1/3}F\left(\frac{d}{h}\right)}\cdot\frac{1}{\sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}\frac{H}{h}k\frac{F\left(\frac{D}{H}\right)}{F\left(\frac{d}{h}\right)}}(1-\eta)-\eta}. \qquad (16)$$

Из выражений (15) и (16) можно установить факторы, влияющие на угол сдвига фаз индукционных бессердечниковых электропечей.

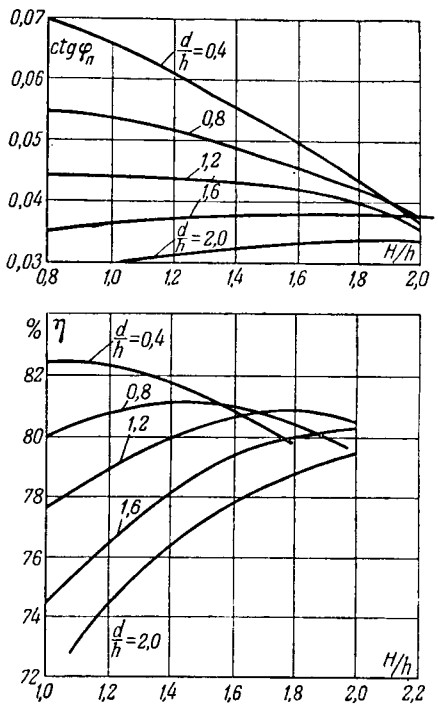


Рис. 5. Кривые изменения $\operatorname{ctg}\varphi_n = f\left(\frac{H}{h}\right)$ и $\eta = f\left(\frac{H}{h}\right)$ для печи с объемом загрузки $V = 160$ *л*.

$\frac{d}{h}$	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0
h	107,5	68,0	52,0	42,6	36,7
d	43,0	54,5	62,4	68,3	73,4
D	58,2	72,0	81,5	87,3	94,4

Как видно из этих выражений, для печи с определенным объемом и материалом загрузки угол сдвига фаз зависит от трех безразмерных параметров, составленных из отношений размеров $\frac{D}{H}$, $\frac{d}{h}$, $\frac{H}{h}$, частоты тока и электрического к. п. д., если не учитывать изменения коэффициента *k*, который в обычных промышленных индукционных печах изменяется незначительно.

Так как для заданного материала загрузки электрический к. п. д. печи при выборе частоты выше определенного предела зависит только от отмеченных выше трех безразмерных параметров [Л. 3], то угол сдвига фаз печи при указанных выше условиях зависит также только от этих трех отношений размеров.

Наличие зависимости величины угла сдвига фаз от трех отношений размеров практически не позволяет анализировать изменение $\operatorname{ctg}\varphi_n$.

Для сокращения числа неизвестных применим эмпирическую зависимость между диаметром индуктора и диаметром загрузки, приведенную в [Л. 3]:

$$D = 1{,}19d + 7{,}16 \approx 1{,}2d + 7{,}2\ [см]. \qquad (17)$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Учитывая (17), для определенного объема загрузки при заданном значении $\frac{d}{h}$ легко определить высоту загрузки и диаметр загрузки и индуктора.

Задаваясь отношением высот $\frac{H}{h}$, принимая определенную глубину проникновения тока и по кривым, приведенным в [Л. 3], величину к. п. д., по выражению (16) можно подсчитать значение $\operatorname{ctg}\varphi_n$.

Расчеты были проведены для печей с объемами загрузок из расплавленной стали 10, 40, 80 и 160 *л* при условной глубине проникновения тока 1 *см*. На рис. 2...5 построены по результатам расчетов кривые изменения $\operatorname{ctg}\varphi_n$. На этих же рисунках для сравнения построены кривые изменения электрического к. п. д.

Общий характер изменения $\operatorname{ctg}\varphi_n$ в зависимости от изменения отношений размеров для печей всех подсчитанных емкостей примерно один и тот же. Это позволяет сделать следующие выводы.

1. Чем меньше отношение $\frac{d}{h}$ или чем меньше диаметр загрузки и больше ее высота, тем меньше угол сдвига фаз или больше величина $\operatorname{ctg}\varphi_n$.

2. При увеличении высоты индуктора или при увеличении отношения $\frac{H}{h}$ для высоких загрузок, имеющих отношение $\frac{d}{h}$ от 0,4 до 1,0, угол сдвига фаз увеличивается и $\operatorname{ctg}\varphi_n$ уменьшается. Для коротких загрузок при отношении $\frac{d}{h} = 1{,}0 \ldots 2{,}0$ изменение $\operatorname{ctg}\varphi_n$ по мере увеличения высоты индуктора незначительно, и его можно не учитывать, хотя для отношений $\frac{d}{h}$, больших 1,6, $\operatorname{ctg}\varphi_n$ несколько увеличивается.

3. При увеличении емкости печи, но при сохранении одной и той же глубины проникновения тока в загрузке (при одной и той же частоте) угол сдвига фаз увеличивается и $\operatorname{ctg}\varphi_n$ уменьшается.

Увеличение угла сдвига фаз печи при увеличении объема загрузки отличается от увеличения угла сдвига фаз в загрузке, так как одновременно с увеличением емкости печи увеличивается электрический к. п. д., вследствие чего [см. формулу (16)] угол сдвига фаз в печи изменяется меньше, чем в загрузке. В итоге, если одновременно с увеличением объема загрузки уменьшать частоту по (6), то величина угла сдвига фаз уменьшается и $\operatorname{ctg}\varphi_n$ будет больше у более крупной печи.

Заключение. Сопоставляя кривые изменения $\operatorname{ctg}\varphi_n$ для сталеплавильных индукционных бессердечниковых электропечей, приведенные на рис. 2...5, и отмеченные выше выводы, можно сделать следующее заключение.

Увеличение $\operatorname{ctg}\varphi_n$ или уменьшение угла сдвига фаз достигается при правильном выборе частоты, при которой принимается наибольшее значение отношения глубины проникновения тока к диаметру загрузки.

При выборе геометрических размеров индукционных бессердечниковых электропечей, при которых достигаются высокие значения как $\operatorname{ctg}\varphi_n$, так и электрического к. п. д., целесообразно выбирать отношение $\frac{d}{h}$ загрузок 0,4... ...0,8, а отношение высот индуктора и загрузки $\frac{H}{h}$ соответственно 1,0...1,5.

Литература

1. Электрические промышленные печи. Под общей редакцией А. Д. Свенчанского. Госэнергоиздат, 1948.

2. Н. В. Окороков. Электроплавильные печи черной металлургии. Металлургиздат, 1950.

3. Г. С. Вайнберг. Выбор размеров индуктора и загрузки индукционной бессердечниковой электропечи. Электричество, № 10, 1954.

4. А. В. Донской. Определение наименьшей частоты тока при индукционном нагреве. Сборник „Электротермия", июль—август, 1947. Изд. Министерства электропромышленности СССР, Севзаппромэлектропечь.

[28.4.1956]

✧ ✧ ✧

Взаимное влияние процессов в электромагнитном и температурном полях при индукционном нагреве

Кандидат техн. наук М. Г. КОГАН
Москва

Для обоснования методов расчета электрических и тепловых режимов индукционных установок необходимо исследовать взаимное влияние процессов в электромагнитном и температурном полях при нагреве стали. Своеобразие этих процессов определяется главным образом нелинейной температурной зависимостью физических свойств металла. Наибольшее влияние на электромагнитное поле в ферромагнитной среде оказывает изменение магнитной проницаемости, которая в узком температурном интервале фазовых и магнитных превращений уменьшается в несколько десятков раз [Л. 1 и 2].

Процесс индукционного нагрева описывается совместной системой нелинейных дифференциальных уравнений Максвелла и Фурье. При решении этой системы можно принять кусочно-постоянную аппроксимацию температурной зависимости физических параметров. Упрощая задачу, достаточно рассмотреть только две стадии: до и после

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

потери поверхностным (токонесущим) слоем металла ферромагнитных свойств. Линеаризация дифференциальных уравнений достигается введением средних (для каждой стадии) значений физических параметров.

Ограничимся исследованием индукционного нагрева стального цилиндра (аксиально-симметричная задача; вектор напряженности магнитного поля направлен по образующей; теплообмен с окружающей средой не учитывается).

Температурное поле описывается следующим уравнением (приложение II):

$$\frac{\lambda}{Rq}t = 2\frac{\lambda}{cR^2}\tau + \frac{1}{2}\left(\frac{r}{R}\right)^2 - \frac{1}{4} - F - S, \quad (1)$$

где t — температура;
τ — время;
q — настил мощности [Л.3] (действительная часть вектора Умова-Пойнтинга на поверхности);
λ — коэффициент теплопроводности;
c — теплоемкость, отнесенная к единице объема;
r — расстояние от оси;
R — радиус цилиндра;
S — сумма ряда, содержащего экспоненциальные функции времени.

Функция F характеризует зависимость конфигурации температурного поля от электромагнитного поля (приложение II):

$$F = \frac{1}{2qR\gamma}(H_\partial^2 - \overline{H}_\partial^2), \quad (2)$$

где H_∂ — действующее (среднеквадратичное) значение напряженности магнитного поля в данной точке, а $\overline{H}_\partial^2$ — значение, усредненное по сечению цилиндра;
γ — электропроводность.

При $\frac{\lambda}{cR^2}\tau > 0{,}2$, когда этой суммой можно пренебречь, заканчивается переходный режим нагрева и наступает квазистационарный режим [Л.4]. В квазистационарном режиме электромагнитное и температурное поля, как непосредственно следует из (1), сохраняют свою конфигурацию. Поднимается только общий уровень температуры; скорость нагрева одинакова во всех точках.

Распределение электромагнитного и температурного полей характеризуется значением критерия K, равного отношению радиуса R к так называемой глубине проникновения тока δ [Л.5]:

$$K = \frac{R}{\delta} = R\sqrt{\frac{\omega\mu_0\mu_r\cdot\gamma}{2}};$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu_0\mu_r\gamma}},$$

где ω — круговая частота тока;
$\mu = \mu_0\mu_r$ — магнитная проницаемость[1].

[1] Относительная магнитная проницаемость μ_r определяется из основной кривой намагничивания при значениях напряженности магнитного поля $H_{\partial.пов}$ (на поверхности).

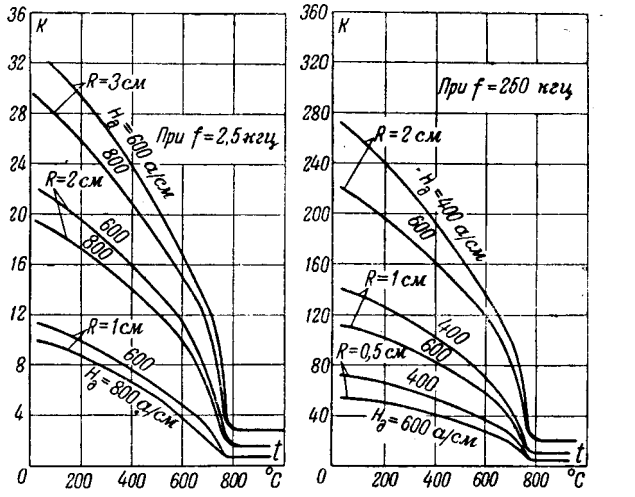


Рис. 1. Изменение значений критерия электрического подобия K при индукционном нагреве стали.
t — температура; R — радиус цилиндра; f — частота тока; H_∂ — действующее значение напряженности магнитного поля на поверхности цилиндра.

Пока сталь находится в ферромагнитном состоянии, при сильно выраженном поверхностном эффекте ($K > 4$) напряженность магнитного поля и настил мощности определяются по приближенным формулам [Л. 6]:

$$\frac{H_\partial^2}{H_{\partial.пов}^2} = \left(\frac{r}{R}\right)^{2K}; \quad (3)$$

$$q = H_{\partial.пов}^2\frac{\sqrt{2K}}{R\gamma} \quad (4)$$

и, следовательно,

$$F = \frac{1}{2\sqrt{2K}}\left(\frac{r}{R}\right)^{2K} - \frac{1}{2\sqrt{2K}(K+1)}. \quad (5)$$

По мере нагрева металла понижаются электропроводность [Л. 7] и магнитная проницаемость [Л.1 и 2], вследствие чего значения критерия K монотонно уменьшаются (рис. 1). Таким образом, температурное поле оказывает через поле физических параметров обратное воздействие на электромагнитное поле, особенно с переходом ферромагнитной фазы стали (перлит) в парамагнитную (аустенит) или по достижении точки Кюри. Одновременно с потерей сталью ферромагнитных свойств изменяется комплексное сопротивление и $\cos\varphi$ системы индуктор — деталь. При постоянном напряжении на зажимах индуктора это вызывает некоторое увеличение тока и напряженности магнитного поля. Однако вследствие резкого понижения значения критерия K настил мощности в соответствии с (4) уменьшается обычно в 2...4 раза[2].

При сильно выраженном поверхностном эффекте переходный процесс в электромагнитном поле завершается очень быстро. Напротив, в слу-

[2] При очень малом зазоре между индуктором и деталью с потерей металлом ферромагнитных свойств наблюдается значительное уменьшение комплексного сопротивления и увеличение тока в индукторе, вследствие чего настил мощности изменяется незначительно, а иногда даже возрастает [Л. 10].

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

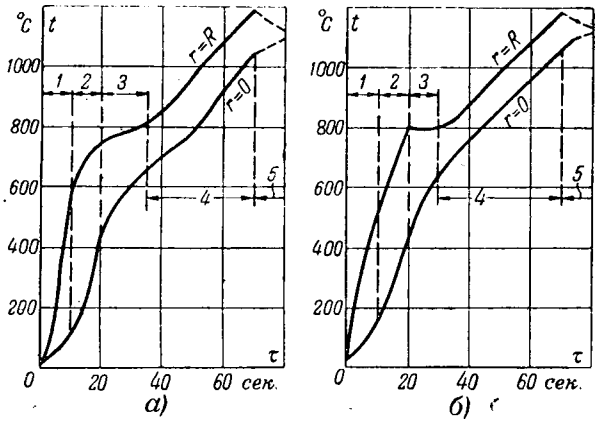


Рис. 2. Изменение температуры t на оси и поверхности цилиндра при индукционном нагреве (диаметр цилиндра 45 *мм*, сталь 45; сильно выраженный поверхностный эффект).

а — экспериментальные кривые; *б* — теоретические кривые (при построении теоретических кривых принято, что после магнитного превращения настил мощности уменьшается в 3 раза); *1* — первый переходный режим; *2* — первый квазистационарный режим; *3* — второй переходный режим; *4* — второй квазистационарный режим; *5* — охлаждение.

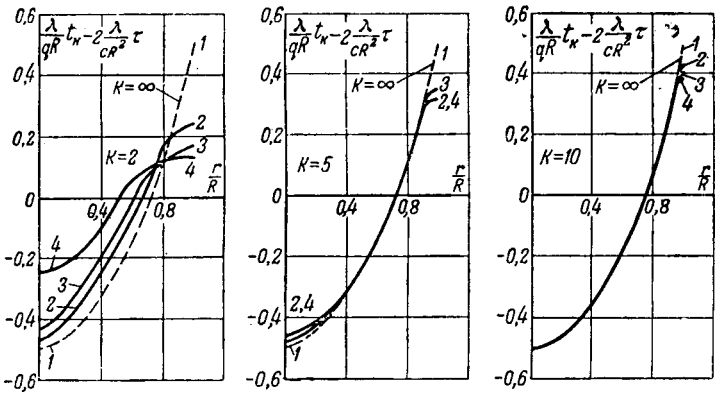


Рис. 3. Распределение температуры в квазистационарном режиме при различных законах распределения мощности.

1 — в случае предельно выраженного поверхностного эффекта ($K\to\infty$); *2* — при нагреве парамагнитной стали; *3* — при нагреве ферромагнитной стали; *4* — при равномерном распределении мощности в тонком поверхностном слое; $t_к$ — температура; τ — время; K — критерий электрического подобия; R — радиус цилиндра; r — расстояние от оси; λ — коэффициент теплопроводности; q — настил мощности; c — теплоемкость, отнесенная к единице объема.

чае слабо выраженного поверхностного эффекта, когда электромагнитное поле проникает на относительно большую глубину, переход токонесущего (активного) слоя стали в парамагнитное состояние и уменьшение настила мощности совершаются в течение большего промежутка времени.

Уменьшение поглощаемой мощности и критерия K, в свою очередь, вызывает возникновение переходного процесса теплопроводности. Установившееся ранее в квазистационарном режиме динамическое равновесие градиентов температуры нарушается. Нагрев поверхностных слоев замедляется или временно приостанавливается, а перепад температуры между поверхностью и серединой уменьшается [Л. 8].

По истечении некоторого промежутка времени наступает второй квазистационарный режим. В цилиндре из парамагнитной стали [Л. 9]

$$\frac{H_д^2}{H_{д.пов}^2} = \frac{\mathrm{ber}^2\sqrt{2K}\,\frac{r}{R} + \mathrm{bei}^2\sqrt{2K}\,\frac{r}{R}}{\mathrm{ber}^2\sqrt{2K} + \mathrm{bei}^2\sqrt{2K}}, \qquad (6)$$

причем $\mu_r = 1$;

$$q = H_{д.пов}^2\frac{\sqrt{2K}}{R\gamma}\times$$

$$\times\frac{\mathrm{ber}\sqrt{2K}\cdot\mathrm{ber}'\sqrt{2K} + \mathrm{bei}\sqrt{2K}\cdot\mathrm{bei}'\sqrt{2K}}{\mathrm{ber}^2\sqrt{2K} + \mathrm{bei}^2\sqrt{2K}}. \qquad (7)$$

Следовательно,

$$F = \frac{\mathrm{ber}^2\sqrt{2K}\,\frac{r}{R} + \mathrm{bei}^2\sqrt{2K}\,\frac{r}{R}}{2\sqrt{2K}\,(\mathrm{ber}\sqrt{2K}\cdot\mathrm{ber}'\sqrt{2K} + \mathrm{bei}\sqrt{2K}\cdot\mathrm{bei}'\sqrt{2K})} -$$

$$- \frac{\mathrm{ber}'\sqrt{2K}\cdot\mathrm{bei}\sqrt{2K} - \mathrm{ber}\sqrt{2K}\cdot\mathrm{bei}'\sqrt{2K}}{2K^2\,(\mathrm{ber}\sqrt{2K}\cdot\mathrm{ber}'\sqrt{2K} + \mathrm{bei}\sqrt{2K}\cdot\mathrm{bei}'\sqrt{2K})}. \qquad (8)$$

На рис. 2 приведены теоретические и экспериментальные кривые индукционного нагрева образца из стали 45 (диаметр 45 *мм*) при сильно выраженном поверхностном эффекте (частота тока 300 *кгц*). Теоретические кривые построены по формуле (1) с учетом (5) для ферромагнитной стали и (8) — для парамагнитной. Принято, что после точки Кюри настил мощности уменьшается в 3 раза. Переходный процесс в интервале фазовых и магнитных превращений рассматривается как наложение двух процессов: выключения нагрева при больших значениях q и K (ферромагнитная сталь) и включения нагрева с меньшими значениями q и K (парамагнитная сталь).

Сопоставление теоретических и экспериментальных кривых, обнаруживающих хорошее сходство, показывает, что при индукционном нагреве стали чередуются четыре режима: переходный, квазистационарный, второй переходный и второй квазистационарный [3].

Наибольший интерес представляет заключительная стадия нагрева — второй квазистационарный режим. Распределение температуры на этой стадии показано на рис. 3 (кривые *2*)[4]. При предельно выраженном поверхностном эффекте $K\to\infty$ и $F\to 0$. Следовательно, согласно (1) температура распределяется по параболе второй степени (кривые *1*, рис. 3), соответствующей нагреву с поверхностными источниками тепла [Л. 4]. При очень слабо выраженном поверхностном эффекте $K\to 0$ и функция (8) стремится к пределу:

$$F = \frac{1}{4}\left(\frac{r}{R}\right)^4 - \frac{1}{12}. \qquad (8а)$$

Следовательно, кривая распределения температуры приближается к параболе четвертой степени.

[3] При очень быстром нагреве квазистационарные режимы не всегда успевают наступить, и характер нагрева определяется наложением двух последовательных переходных процессов

[4] Кривые *3* для сравнения построены по формулам (1) и (5), соответствующим нагреву ферромагнитной стали. Кривые *4* соответствуют упрощенному закону изменения электромагнитного поля, когда принимается, что вся мощность равномерно распределяется в тонком поверхностном слое [Л. 11].

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

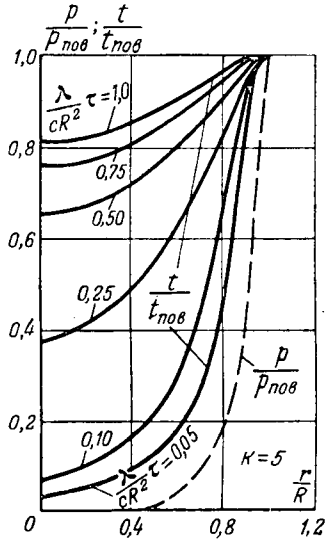


Рис. 4. Распределение мощности p и температуры t (отнесенных к значениям на поверхности) при индукционном нагреве цилиндра. r — расстояние от оси; R — радиус цилиндра; τ — время; λ — коэффициент теплопроводности; K — критерий электрического подобия.

Таким образом, при индукционном нагреве понижение частоты тока уменьшает, но принципиально полностью не устраняет неравномерности температурного поля. Более равномерное распределение температуры достигается увеличением продолжительности операции.

В качестве примера на рис. 4 показано объемное распределение мощности и температуры в различные моменты времени. При малых значениях комплекса $\frac{\lambda}{cR^2}\tau$ обе кривые почти совпадают. Но в дальнейшем внутренние слои металла нагреваются преимущественно за счет притока тепла от внешних слоев. Соответственно в выражении (1) относительное значение первого члена, характеризующего общий подъем температуры, все возрастает, а значения последующих членов, характеризующих неравномерность температурного поля, убывают.

Из (1) также следует, что во втором квазистационарном режиме от предшествовавших режимов нагрева зависит только общий уровень температуры, но не ее распределение по сечению цилиндра. Это обстоятельство особенно важно при расчетах индукционных нагревательных печей [Л. 12].

В индукторе методической печи имеются три последовательно расположенные зоны, соответствующие различным стадиям нагрева стальных заготовок. В первой зоне металл находится в ферромагнитном состоянии (первый переходный и квазистационарный режимы). Во второй совершается постепенный переход металла в парамагнитное состояние (начиная с поверхностных слоев). В третьей зоне происходит нагрев металла в температурном интервале выше точки Кюри (второй квазистационарный режим). По выходе из третьей зоны поверхность заготовок должна достигнуть заданной температуры (при штамповке обычно 1 100 . . . 1 200° С) с минимально допустимым перепадом температуры $\Delta t_{доп}$ по сечению (обычно 50 . . . 100° С).

Но согласно (1) во втором квазистационарном режиме

$$\frac{\Delta t\lambda}{qR} = \frac{1}{2} - F_{пов}, \qquad (9)$$

причем $F_{пов}$ определяется из (8) при $r = R$. Таким образом, допустимое значение настила мощности $q_{доп}$, при котором перепад не превышает заданного значения, обратно пропорционально радиусу заготовки. В частности, при $\lambda = 0{,}3$ *вт/см* °С (углеродистая сталь) и $K = 1{,}5 \ldots 3{,}0$ (наиболее характерный случай нагрева стальных заготовок диаметром 30 . . . 60 *мм* в третьей зоне печи при частоте тока 2,5 *кгц*) имеет место простое соотношение

$$Rq_{доп} = \Delta t_{доп},$$

которое устанавливает связь между тепловыми и электрическими режимами индукционных установок.

Аналогичным образом можно показать, что допустимая скорость нагрева в третьей зоне печи пропорциональна заданному перепаду и обратно пропорциональна квадрату радиуса, а общая продолжительность нагрева пропорциональна квадрату радиуса и обратно пропорциональна перепаду. В свою очередь, эти данные технологических режимов определяют электрические и технологические параметры индукционных установок.

Расчеты показывают, что усреднение физических характеристик стали в пределах всего температурного интервала нагрева приводит к заведомо неверным результатам. Только при учете рассмотренных существенно нелинейных соотношений, устанавливающих взаимную связь процессов в электромагнитном и температурном полях, можно дать правильное обоснование практическим режимам индукционного нагрева.

Приложение I. При индукционном нагреве цилиндра мощность p, выделяющаяся в металле, связана с действующим значением напряженности магнитного поля $H_д$ в данной точке следующим соотношением:

$$p = p_в + p_г = \frac{1}{2\gamma}\nabla^2 H_д. \qquad (10)$$

Действительно, в случае аксиально-симметричной задачи (магнитное поле направлено по образующей)

$$\frac{1}{2\gamma}\nabla^2 H^2 = \frac{1}{2\gamma}\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial H^2}{\partial r}\right) = \frac{1}{\gamma}\left[\left(\frac{\partial H}{\partial r}\right)^2 + H\nabla^2 H\right].$$

Но $\frac{\partial H}{\partial r} = \gamma E$ и

$$\nabla^2 H = -\operatorname{rot}\operatorname{rot} H = \frac{\partial B}{\partial \tau},$$

следовательно,

$$\frac{1}{2\gamma}\nabla^2 H^2 = \gamma E^2 + H\frac{\partial B}{\partial \tau}.$$

После усреднения за период и перехода к действующим значениям первое слагаемое в правой части этого равенства представит мощность потерь от вихревых токов $p_в$, а второе — от гистерезиса $p_г$. Таким образом, подтверждается формула (10).

Приложение II. Дифференциальное уравнение теплопроводности при индукционном нагреве цилиндра имеет вид:

$$c\frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda\nabla^2 t + p. \qquad (11)$$

В квазистационарном режиме скорость нагрева во всех точках одинакова [Л. 4] и равна среднему значению мощности, отнесенному к теплоемкости:

$$\frac{\partial t_к}{\partial \tau} = \frac{q2\pi R}{\pi R^2} = \frac{2q}{R}. \qquad (12)$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Подставляя (10) и (12) в (11), получим для квазистационарного режима обыкновенное дифференциальное уравнение

$$\nabla^2\left(\lambda t_к + \frac{1}{2\gamma} H_\partial^2\right) = \frac{2q}{R}.$$

Непосредственное интегрирование дает:

$$\lambda t_к = qR\left[\frac{2\lambda}{cR^2}\tau + \frac{1}{2}\left(\frac{r}{R}\right)^2 - \frac{1}{2qR\gamma} H_\partial^2 + C\right]. \qquad (13)$$

Константа интегрирования C определяется из условия, что общий прирост теплосодержания равен количеству энергии, затраченному за все время нагрева:

$$\int_0^R ct_{к.с}\, 2\pi r dr = 2\pi R q\tau;$$

$$C = -\frac{1}{4} + \frac{1}{2qR\gamma}\overline{H}_\partial^2.$$

Подставляя значение C в (13), найдем решение для квазистационарного режима:

$$\frac{\lambda}{qR} t_к = 2\frac{\lambda}{cR^2}\tau + \frac{1}{2}\left(\frac{r}{R}\right)^2 - \frac{1}{4} - F, \qquad (14)$$

где

$$F = \frac{1}{2qR\gamma}\left(H_\partial^2 - \overline{H}_\partial^2\right).$$

Чтобы получить теперь выражение (1), справедливое при любом значении времени, в том числе и при переходном режиме, необходимо, как легко показать, прибавить к (14) сумму ряда

$$S = \sum_{i=1}^{\infty} W_i \eta_i^{-2} \cdot J_0\left(\eta_i \frac{r}{R}\right) \exp\left(-\eta_i^2 \frac{\lambda\tau}{cR^2}\right),$$

где η_i — корни уравнения $J_1(\eta_i) = 0$, а W_i — коэффициент Фурье-Бесселя функции p:

$$W_i = \frac{2}{qRJ_0^2(\eta_i)} \int_0^R pJ_0\left(\eta_i \frac{r}{R}\right) rdr.$$

Литература

1. Труды Пьера Кюри. Gauthier-Villars. Paris, 1908.
2. E. Dussler. Температурная зависимость намагниченности кристаллов железа. Z. f. Phys., т. 50, № 1, 1928.
3. В. К. Аркадьев. Электромагнитные процессы в металлах, ч. 2, ОНТИ, 1936.
4. А. В. Лыков. Теория теплопроводности. ГИТТЛ, 1952.
5. Г. И. Бабат. Индукционный нагрев металла и его промышленное применение. Госэнергоиздат, 1946.
6. Л. Р. Нейман. Поверхностный эффект в ферромагнитных телах. Госэнергоиздат, 1949.
7. П. Я. Сальдау. Метод электропроводности при высоких температурах и его применение для исследования металлических сплавов. Изд. АН СССР, 1952.
8. И. Н. Кидин и М. Г. Коган. Температурные условия фазовых превращений при индукционном нагреве стали. ЖТФ, т. 24, вып. 11, 1954.
9. Н. М. Родигин. Индукционный нагрев стальных изделий. Металлургиздат, 1950.
10. Г. И. Дорофеев. Диссертация «Исследование эквивалентных параметров индукторов при высокочастотном нагреве». ЛЭТИ, 1952.
11. В. П. Вологдин. Поверхностная индукционная закалка. Оборонгиз, 1947.
12. Я. И. Каркер и М. Г. Коган. Промышленное применение токов высокой частоты (Труды первой ленинградской конференции). ЛОНИТОМАШ, 1952.

[29.9.1955]

✧ ✧ ✧

Из опыта работы

Экспериментальное исследование пусковых процессов асинхронных двигателей

Кандидат техн. наук В. А. ГЛЕБОВ
Ростовский институт инженеров железнодорожного транспорта

Известно, что при быстро протекающих переходных процессах во многих случаях механические характеристики асинхронных двигателей значительно отличаются от статических механических характеристик. Это показано, например, в работах Е. Я. Казовского [Л. 1], в которых разработаны аналитические методы решения переходных процессов машин переменного тока и, в частности, методы решения процессов пуска и торможения асинхронных двигателей.

Изучению вопросов, непосредственно связанных с применением указанных методов решения переходных процессов, посвящено большое количество работ. Однако, несмотря на тщательные теоретические исследования в данной области, вопрос экспериментальных исследований оставался пока недоработанным. Имеющиеся экспериментальные данные в лучшем случае могут явиться лишь некоторой общей иллюстрацией к полученным теоретическим решениям. Естественно, что это отрицательно сказывается на практическом применении разработанных методов и может даже привести к неверным выводам.

В настоящей работе поставлена задача: получить представления о реальных пусковых процессах асинхронных двигателей непосредственно из опыта.

Процесс пуска асинхронных короткозамкнутых двигателей связан с изменением ряда величин — тока, мощности, $\cos\varphi$ скорости вращения, вращающих моментов, температуры нагрева и др. С точки зрения электропривода наиболее важным является получение зависимостей скорости вращения от времени, вращающих моментов от времени и вращающих моментов от скорости.

Основной зависимостью, полученной автором непосредственно из опыта, явилась зависимость скорости вращения от времени. Так как величи-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ны n, M и t связаны между собой основным уравнением движения электропривода, то очевидно, что получение зависимостей $M=f(t)$ и $M=\psi(n)$ не могло вызвать принципиальных затруднений и было проведено графоаналитическим путем. Для обеспечения точности, необходимой для представления основных явлений при пуске, построения проводились в достаточно крупном масштабе, а для устранения влияния посторонних факторов опыты проводились при холостом ходе двигателя. Изменение времени отдельных пусков производилось за счет изменения махового момента, а также за счет изменения схемы включения двигателя в сеть (звезда и треугольник).

Зависимости $n=\varphi(t)$ были получены при помощи прерывателя. Устройство его состоит в следующем. К валу ротора прикрепляется диск с равномерно распределенными по окружности прорезями. Диск располагается между источником света и фотоэлементом. При вращении ротора через каждую долю оборота фотоэлемент освещается, и соответствующий импульс отмечается на осциллограмме.

Методика построения кривой $n=\varphi(t)$ по полученной осциллограмме. Для периода разгона двигателя на осциллограмме выбирается достаточное количество точек, соответствующих различным моментам времени, и для каждого из них расчетным путем определяются средние значения скорости вращения ротора двигателя.

Примем следующие обозначения:

n — средняя скорость вращения ротора, *об/мин*;
A — скорость записи (длина осциллограммы измеряется в *гц* отметчика времени);
K — количество прорезей в диске;
a — интервал, соответствующий $1/K$ оборота ротора (измеряется периодами отметчика времени).

Значения средней скорости вращения ротора могут быть определены из равенства

$$\frac{n}{60}=\frac{A}{Ka}.$$

Если обозначить погрешность отсчета при измерении интервала a через C, а погрешность измерения через Δ, то можно написать:

$$\Delta=\frac{C}{a}100\%=\frac{CKn}{60A}100\%.$$

Из последнего равенства видно, что при постоянных значениях C, A и K погрешность измерения возрастает с ростом n. Для того чтобы избежать большой погрешности, необходимо с увеличением скорости уменьшать количество учитываемых прорезей диска, т. е. для определения средней скорости вращения в данный момент времени за интервалы принимать сначала интервалы, соответствующие $1/K$ оборота, затем — $1/2K$, $1/3K$ и т. д.

В нашем случае запись характеризуется следующими данными: $A=10\,000$ *гц* (при скорости ленты осциллографа 5 *м/сек*), $C=0{,}5$ периода (что вполне допустимо, так как 1 период соответствует 0,5 *мм*), количество прорезей диска равно 240. Количество учитываемых прорезей при измерениях составляет: до 100 *об/мин* — 240; от 100 до 200—120; от 200 до 400—60; от 400 до 800—30; от 800 до 1 000—20.

Подставляя приведенные величины в формулу для Δ, можно установить, что во всем диапазоне измерений погрешность не превышает 2%. Таким образом, точность получения кривой скорости в данном случае получается весьма высокой.

Изложенный способ получения зависимости $n=\varphi(t)$ является трудоемким, но его достоинство состоит в том, что результат здесь не зависит от каких-либо промежуточных звеньев и является достоверным. Это позволяет получить достаточно точную кривую изменения скорости вращения во времени, а после проведения известных из теории электропривода графоаналитических решений — получить ясные представления о пусковых процессах асинхронных короткозамкнутых двигателей.

Переходные процессы при пуске различных асинхронных короткозамкнутых двигателей протекают в общем аналогично и различаются меж-

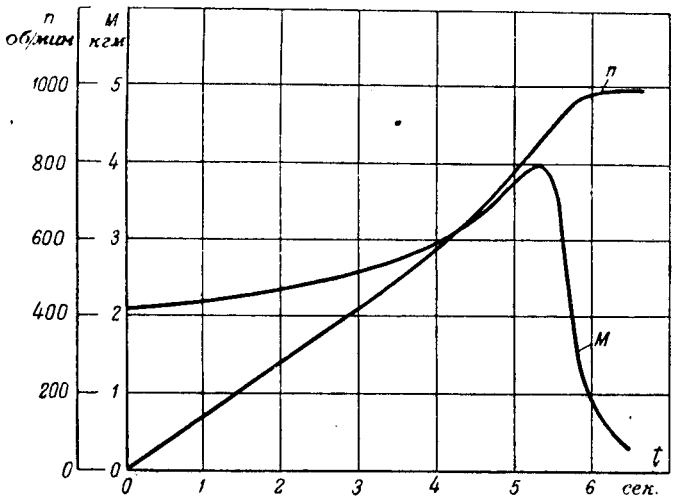


Рис. 1.

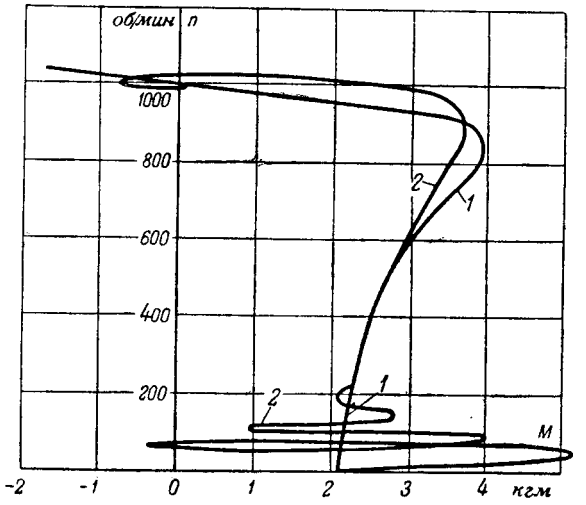


Рис. 2.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ду собой лишь численными значениями величин.

Ниже приводятся экспериментальные данные применительно к асинхронному короткозамкнутому двигателю ТАК332-6 5,5 *квт*, 960 *об/мин*, 12,2/21 *а*, 380/220 *в* (напряжение сети 220 *в*).

На рис. 1 приведены кривые $n = \varphi(t)$ и $M = f(t)$ для пуска, длительность которого составляет 6 *сек* ($GD^2 = 5{,}73$ *кгм²*; соединение — звезда). По кривым рис. 1 построена механическая характеристика двигателя (кривая *1*, рис. 2). В данном случае переходные электромагнитные процессы не оказывают практически никакого влияния на пусковой процесс, и полученная механическая характеристика является статической.

На рис. 3 сплошными линиями нанесены полученные из опыта кривые $n = \varphi(t)$ и $M = f(t)$ для пуска, длительность которого составляет 0,4 *сек* ($GD^2 = 0{,}35$ *кгм²*, соединение — звезда). Пунктирными линиями нанесены аналогичные кривые, но в предположении, что кривая вращающих моментов остается статической. На рис. 3 видно, что в этом случае влияние переходных электромагнитных процессов практически ощущается, и действительно имеющая место механическая характеристика заметно отличается от статической (кривая *2* рис. 2).

Для лучшего представления о происходящих процессах на рис. 4 приведено разложение общей кривой вращающих моментов на составляющие. Сначала на рис. 4 была построена кривая *1* — основная (статическая) кривая вращающих моментов (для определенных моментов времени по общей кривой моментов рис. 3 определялись соответствующие скорости; по полученным скоростям из рис. 2 по кривой *1* определялись соответствующие статические моменты, включая и генераторный режим), затем были получены кривые *2* и *3* дополнительных вращающих моментов путем вычитания значений кривой *1* рис. 4 из соответствующих значений общей кривой вращающих моментов.

Наличие пульсирующих вращающих моментов в начальной части (кривая *2*, рис. 4) обусловлено возникновением в роторе свободных токов в момент включения, затухающих с течением времени. Если бы ротор оставался неподвижным, то период пульсации вращающих моментов, очевидно, равнялся бы 0,02 *сек*; при вращении же ротора период увеличивается с ростом скорости.

Наличие пульсирующих вращающих моментов, представленных кривой *3* рис. 4, объясняется возникновением в роторе свободных токов, обусловленных быстрым изменением скорости вращения ротора. Как известно, рост вращающих моментов с увеличением скорости вращения асинхронного двигателя в основном объясняется уменьшением угла сдвига между током ротора и вращающимся магнитным потоком, а последующий переход к уменьшению вращающих моментов — уменьшением токов ротора. Свободные токи, интенсивность которых возрастает с увеличением ускорения, стремятся поддержать неизменными амплитуду и фазу токов ротора. Это приводит к тому, что интенсивность нарастания вращающих моментов будет тем меньше, чем меньше время пуска двигателя, т. е. возникающие свободные токи создают дополнительные отрицательные вращающие моменты (в начале пуска здесь этот эффект практически не сказывается, так как амплитуда и фаза токов ротора еще изменяются очень мало). При достаточно высокой скорости вращения ротора в силу замедленного изменения величины тока уменьшение вращающих моментов происходит в меньшей степени, чем по статической характеристике, т. е. в данном случае свободные токи вызывают дополнительные положительные вращающие моменты. Вследствие этого скорость вращения двигателя становится выше синхронной, и в дальнейшем процесс становится аналогичным процессу колебания ротора синхронной машины (с затуханием свободных токов в роторе).

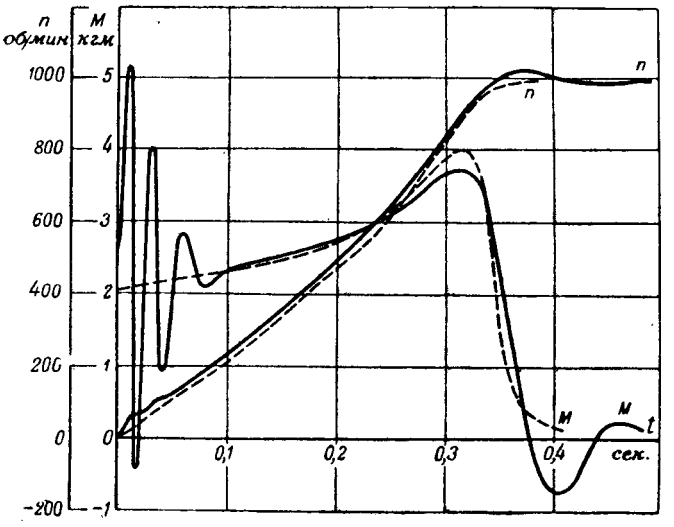


Рис. 3.

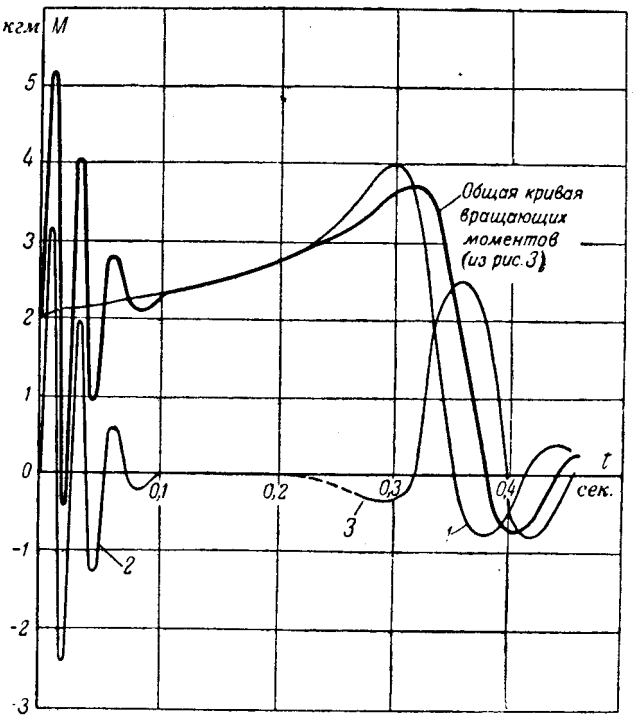


Рис. 4.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

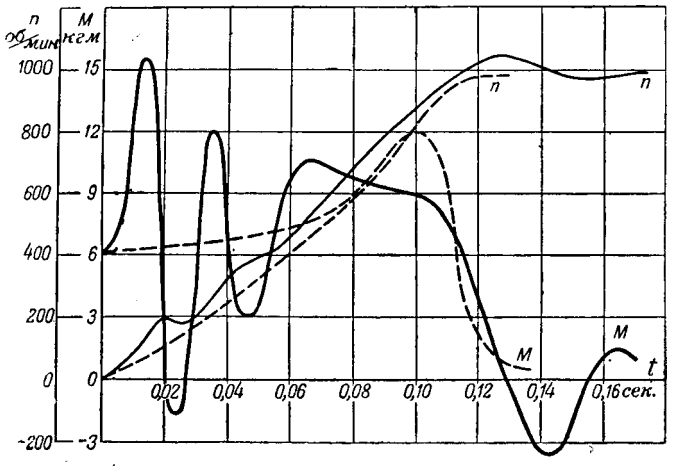


Рис. 5

На рис. 5 сплошными линиями изображены полученные из опыта кривые $n = \div(t)$ и $M = f(t)$ для пуска, длительность которого составляет 0,12 *сек* ($GD^2 = 0{,}35$ *кгм*^{2}; соединение — треугольник). Пунктирными линиями изображены аналогичные кривые, но в предположении, что кривая вращающих моментов остается статической.

На рис. 6 приведено разложение общей кривой вращающих моментов на составляющие. Разложение было выполнено так же, как и в предыдущем случае (необходимая для разложения статическая механическая характеристика представлена кривой *1*, рис. 7).

При данном быстро протекающем пусковом процессе имеют место явления, аналогичные вышеописанным, но электромагнитные процессы здесь играют более существенную роль; это вызывает полное искажение механической характеристики асинхронного двигателя при пуске (кривая *2*, рис. 7). При этом следует отметить, что полученная форма механической характеристики соответствует результатам теоретического анализа [Л. 1].

Кривая нарастания скорости вращения, полученная опытным путем (рис. 5), имеет неравномерный характер, вследствие действия дополнительных вращающих моментов; кривая, рассчитанная по статической механической характеристике, является плавной. В первом случае скорость вращения вначале нарастает быстрее, чем во втором, так как средняя составляющая пульсирующих моментов имеет положительное значение, а одновременно интенсивное нарастание скорости вращения вызывает увеличение моментов по статической механической характеристике. Это приводит к тому, что в процессе пуска величина скорости вращения для одного и того же момента времени для разных кривых существенно различна. Например, в рассматриваемом случае это различие доходит до 60%. Во второй стадии пуска скорость вращения, соответствующая статической характеристике (вследствие большей величины вращающих моментов), нарастает более интенсивно по сравнению с нарастанием скорости, имеющим место в действительности. Это приводит к тому, что время пуска (исключая конечную стадию переходного процесса) в обоих случаях имеет величину одного и того же порядка. Для пуска, представленного кривыми рис. 5, различие во временах пуска составляет всего несколько процентов. Для случая же, представленного на рис. 3, различие практически не ощущается.

На основании сказанного легко объясняется тот факт, что, несмотря на большое различие между статическими механическими характеристиками и механическими характеристиками, имеющими место при быстром пуске, различие между временами пуска асинхронных двигателей, полученными на основании расчета по статическим механическим характеристикам и опытным путем, даже для пуска вхолостую является весьма незначительным.

Картина, полученная в рассмотренном случае, является приближенной и дает основание судить лишь о качественной стороне наиболее существенных явлений, но она является простой и на-

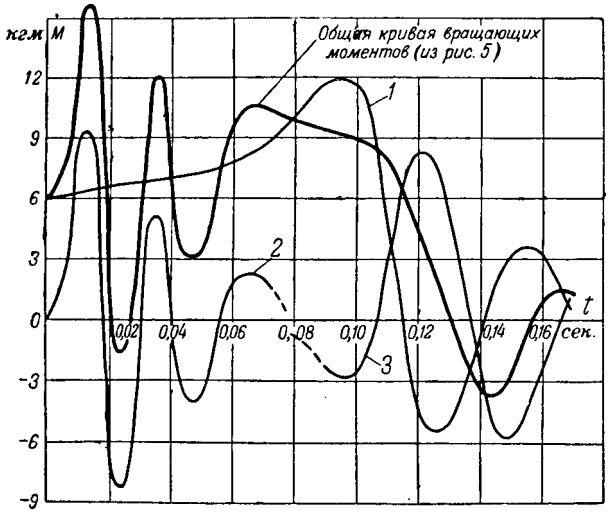


Рис. 6

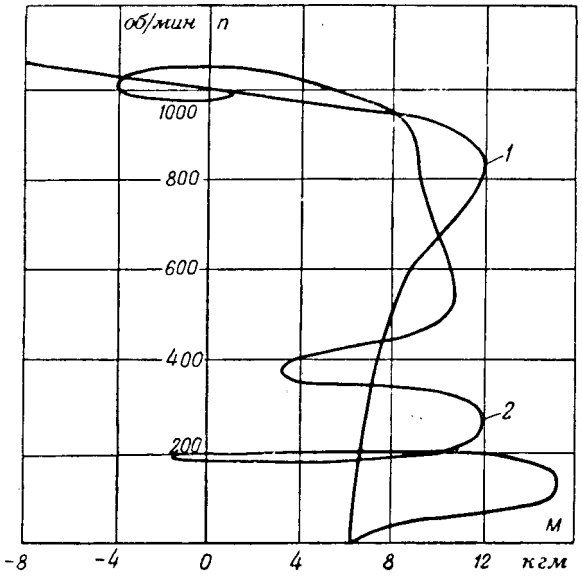


Рис 7

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

глядной, а поэтому может способствовать более правильному решению практических задач.

Покажем это на некоторых примерах общего характера, связанных с решениями пусковых процессов асинхронных двигателей.

1. Произведенное выделение из общей кривой дополнительных вращающих моментов (рис. 4 и 6) дает возможность производить правильную оценку их влияния на процесс пуска. До сих пор подобное разделение общей кривой вращающего момента на составляющие отсутствовало, и наличие в кривой двух типов дополнительных вращающих моментов не представлялось отчетливо. Это положение порождало иногда неверные рекомендации для решения пусковых процессов, заключающиеся в предложении разделять переходные процессы при относительно большой их продолжительности на два периода: начальный (когда дополнительные моменты действуют) и последующий (когда затухание свободных токов закончилось и дополнительные моменты якобы отсутствуют). Из изложенного выше следует, что подобные рекомендации не имеют оснований, так как и во второй стадии процесса вследствие быстрого изменения скорости возникают значительные дополнительные вращающие моменты.

2. В учебниках по электроприводу часто вместо действительных кривых нарастания скорости при пуске асинхронных двигателей приводятся кривые, рассчитанные на основании статических механических характеристик, что не всегда согласуется с опытом. При этом замечания о пренебрежении электромагнитными процессами не могут повысить строгость изложения, так как отклонения этих кривых от кривых, имеющих место в действительности, могут достигать весьма больших величин.

Для более правильного представления кривых нарастания скорости при пуске асинхронных короткозамкнутых двигателей необходимо различать два случая:

а) Влияние электромагнитных процессов на пусковой процесс очень мало. В этом случае кривые скорости могут быть получены на основании расчета по статическим механическим характеристикам.

б) Влияние электромагнитных процессов на пусковой процесс весьма велико. В этом случае кривые скорости необходимо представлять, исходя из реального процесса с учетом действия дополнительных вращающих моментов. Из рис. 5 видно, что представление процесса пуска на основании статической характеристики является очень грубым и далеко не соответствует действительности.

3. С целью упрощения решения задач в разное время были сформулированы своего рода критерии для возможности пренебрежения влиянием дополнительных вращающих моментов на пусковой процесс (по продолжительности времени пуска, по соотношениям постоянных времени, по энергетическим показателям и др.).

На основании проведенной работы можно сказать, что подобные рекомендации имеют очень мало оснований. В самом деле, пусть общее время пуска будет относительно большим. Однако это не означает, что дополнительными вращающими моментами можно пренебречь, так как общее время пуска не характеризует еще процесс полностью. Действительно, если механизм имеет момент сопротивления типа вентиляторного с малым начальным значением, то нарастание скорости будет интенсивным, и на процесс могут оказать существенное влияние дополнительные вращающие моменты в начальной стадии пуска. При пуске же двигателя с механизмом, имеющим большой начальный момент сопротивления и малые моменты сопротивления в последующем, на процесс могут оказать влияние дополнительные вращающие моменты, возникающие во второй стадии пуска.

Из приведенных в работе данных видно, что необходимость учета влияния электромагнитных переходных процессов зависит от ряда факторов: характера задачи, необходимой точности решения, свойств механизма, характеристик двигателя и др. Так, для практических задач электропривода, не требующих большой точности и целью которых является определение времени пуска, в основу расчета могут быть положены статические механические характеристики (тем более, что двигатели обычно всегда соединены с механизмами, поэтому время их пуска увеличивается по сравнению с пуском только одного двигателя; следовательно, ошибка при определении времени пуска будет невелика). В этих же случаях, но при решении задач, связанных с определением скорости вращения в различные моменты времени пускового периода, пренебрежение электромагнитными процессами может привести к большим ошибкам. Поэтому в таких случаях учет влияния электромагнитных процессов может стать совершенно необходимым.

Таким образом, общие условия, не учитывающие данных конкретной задачи, не могут являться основанием для выбора того или иного пути решения.

Автор выражает свою благодарность работникам Ростовского института инженеров железнодорожного транспорта П. И. Лазареву, В. Б. Скварковскому и Д. Я. Сученко за помощь в организации и проведении экспериментов.

Литература

1. Е. Я. Казовский. Некоторые вопросы переходных процессов в машинах переменного тока. Госэнергоиздат, 1953.

[21.6.1956]

◇ ◇ ◇

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Из истории электротехники

Работы С. П. Власова в области учения о гальванических элементах

Среди последователей и учеников В. В. Петрова был Семен Прокофьевич Власов (1789—1821). Сведения о его электрохимических исследованиях весьма ограничены. До последнего времени оставались неизвестными его публикации. Недавно мы обнаружили оригинальные статьи С. П. Власова в журнале «Соревнователь просвещения», издававшемся в 20-х годах прошлого века.

Новые материалы содержат данные об исследованиях С. П. Власова по физико-химии гальванических элементов.

Статьи Власова дают возможность установить в каком направлении шло развитие электрохимических исследований в Медико-хирургической академии после В. В. Петрова.

Чтобы в должной мере оценить заслуги Власова, необходимо учесть, что в те годы господствовали еще представления А. Вольты (1745—1827) о решающей роли контакта металлов в генерации тока. Теория контакта поддерживалась, по выражению М. Фарадея, «целым сонмом ученых». В тот период противники контактной теории впадали в другую крайность, преувеличивая роль химических процессов. В борьбе сторонников двух противоположных концепций создавались основы электрохимической теории. Очевидно, что электрохимическая теория являлась более прогрессивной, так как она свободна от метафизической ограниченности первых двух.

К какому же лагерю принадлежали В. В. Петров и С. П. Власов? В своей знаменитой книге [Л. 1] Петровым было показано, что крайние металлические диски батареи служат лишь проводниками электричества, и поэтому их можно отбросить, не ослабляя батареи. Такое указание шло вразрез с теорией Вольты; приоритет В. В. Петрова в установлении этого важного факта признан не только в русской, но, например, и в английской литературе [Л. 2]

Подобно своему учителю изучением электрических явлений занимался и С. П. Власов [Л. 3 и 4]. Ему принадлежат такие формулировки: «Электричество — чрезвычайно тонкое и упругое вещество.. »; «электрической жидкости, постоянно существующей, в природе нет, а образуется она временно при известных химических процессах через составление»; «образование электричества есть химический процесс».

В теоретических взглядах Власова в качестве положительных моментов можно отметить: во-первых, признание единства природы естественного и искусственно получаемого электричества; во-вторых, отказ от представления о «гальвани-вольтовской жидкости», в-третьих, признание, что ток в гальваническом элементе образуется за счет химического процесса. Результаты исследования Власова по химическим источникам тока были опубликованы в 1820 г. [Л 5]. Власов писал: «Производя испытания мои над металлоидами[1] посредством гальванического корытного прибора[2], я нашел в обыкновенном устройстве оного некоторые несовершенства, относительно соединения вместе двух кружков: медного и цинкового, отчего сам процесс нимало не увеличивается, а только употребляются излишние кружки; ибо во время работы оного гальванизм действует только между разнородными металлами в двух парах находящимися; другие же кружки, в тех же парах, остаются без всякой пользы» (разрядка наша. — *Н. М.*).

Вдумаемся в этот текст. Прежде всего заметим, что под термином «пара металлов» современники Власова имели в виду контакт двух разнородных металлов, как это показано на схеме

$$\underbrace{Cu\,|\,Zn}_{1\text{-я пара}}\,|\,Э\,|\,\underbrace{Cu\,|\,Zn}_{2\text{-я пара}}\,|\ldots Э\,|\,\underbrace{Cu\,|\,Zn}_{n\text{-ная пара}}$$

(*Э* — прокладка, смоченная электролитом).

Власов путем рекомбинации вольтовых пар приходит к гальванической паре в той форме, как это общепринято в наше время. Мысль Власова может быть пояснена такой схемой:

$$\underbrace{Zn\,|\,Э\,|\,Cu}_{1\text{-я пара}}\ \ldots\ \underbrace{Э\,|\,Zn\,|\,Э\,|\,Cu}_{n\text{-ная пара}}$$

Из сопоставления вышеприведенных схем очевидно, что «гальванический прибор» Власова — это вовсе не столб» Вольты и не «гальвани-вольтовская батарея» Петрова[3], это также и не «корытный прибор», с которым вначале экспериментировал Власов, а нормально собранная батарея элементов.

С. П. Власов сообщает: «Я употребляю в гальваническом приборе кружки или пластинки двух разнородных металлов и кладу оные в корытном аппарате на довольном друг от друга расстоянии, которое тем более может быть умножено, чем более будет величина кружков. От сего действие гальванического процесса бывает сильнее, и притом избегается излишнее употребление кружков».

Очевидно, что здесь идет речь об исследованиях зависимости между током и внутренним сопротивлением элемента. Подобные работы велись тогда и в других странах.

Власов не ограничивается испытанием батарей из медных и цинковых электродов различных размеров. Он сообщает: «Равным образом пробовал я употреблять вместо оных железо, чугун, свинец, медь и другие металлы; также уголь, дерево и иные растительные вещества, а вместо аммиакового и нашатырного растворов, таковые же разных кислот, (едкого) кали, извести, барита, поваренной соли и проч. Причем, то более, то менее происходили гальванические явления».

Отсюда видно, что С. П. Власовым велось изучение зависимости гальванических явлений не только от величины поверхности электродов и от расстояния между ними, но также исследовалось влияние материала электродов и свойств электролита.

Далее читаем: «Равным образом не могу оставить без особого внимания следующий опыт. Если в стеклянную банку положить цинковый кружок или пластинку, на которую после налить крепкий раствор едкого кали и положить в оный спирально-свернутую железную проволоку, то в сём случае последует разложение воды в такой степени, что едва ли могут подобное произвести 5 000 пар кружков обыкновенного корытного прибора»[4].

Здесь прежде всего привлекает внимание рекомендация «крепкого раствора едкого кали» для системы Zn | KOH Fe. Попутно заметим, что в своей знаменитой батарее В. В. Петров пользовался насыщенным раствором нашатыря, чтобы получить «сильнейшие и продолжительнейшие действия батареи» Zn | NH_4Cl | Cu

---

1 Калием и натрием. — *Н. М.*

2 Так называлась ящичная батарея, в которой вольтовы пары были погружены в раствор электролита. — *Н. М.*

3 Батарея В. В. Петрова строилась по схеме ЦМБЦМБ. Русские обозначения Ц—цинк, М—медь, Б—бумага были предложены Петровым (1803).

4 Власовым допущено преувеличение. — *Н. М.*

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Интересно упомянутое выше предложение С. П. Власова (1820 г.) о применении электрода спирально-свернутой формы. В дальнейшем (1824 г.) американским химиком Р. Харом также был предложен элемент Zn H_2SO_4 Cu с цинковым спирально-свернутым электродом [Л. 6].

Электрохимические работы С. П. Власова были хорошо известны в ученых кругах Петербурга. О них знали не только в Медико-хирургической академии и Горном корпусе, где работал Власов, но и в ряде научных обществ, членом которых он состоял. В июне 1820 г. состоялось его публичное выступление в Обществе соревнователей просвещения. Лекция сопровождалась опытами «посредством новоизобретенных им аппаратов». Лекция Власова вскоре была напечатана.

О важности исследований Власова и высоком их уровне можно судить также по таким данным. В обзоре научных открытый за 1820 г. (Revue Encyclopédique) сообщалось о «новой теории гальванического прибора» профессора химии в Пенсильвании Роберта Хара (R. Hare, 1781—1858) и об изобретенном им гальваническом элементе с одной медноцинковой парой большого диаметра. Хар «упрекает физиков, что они предпочитают гальванические приборы с большим количеством кружков вместо кругов большего диаметра». Редакция журнала «Соревнователь просвещения» сопроводила эту заметку примечанием: «Наш химик С. П. Власов гораздо прежде сего устроил точно такой прибор из двух кругов меди и цинка, имеющих около пол-аршина в диаметре. Посредством сего прибора также сильно раскалялась платиновая проволока. Мы были свидетелями опытов с оным прибором на публичных лекциях в Горном корпусе и в Обществе любителей российской словесности» [Л. 7].

Зимой 1818—1819 гг. английский профессор физики и химии В. Аллен (W. Allen, 1770—1843) приезжал в Петербург. В физическом кабинете Медико-хирургической академии перед ним демонстрировался «в действии гальванический снаряд, Власовым изобретенный» [Л. 8]. Прибор привлек внимание английского физика и был одобрен им. После отъезда из России В. Аллен вступил в переписку с С. П. Власовым. Труды первой русской электрохимической школы были известны за границей.

В физическом кабинете Медико-хирургической академии исследовательская работа по гальваническим элементам, начатая В. В Петровым, не прекращалась. Из сообщения С. П. Власова, датированного 1820 г., видно, что внимание физиков академии было сосредоточено на выяснении закономерностей во внутренней части гальванической цепи.

Многие замыслы Власова остались неосуществленными, но и то, что он успел сделать, характеризует его как талантливого ученого. Еще в 1824 г. известный профессор Московского университета И. А. Двигубский в историческом обзоре развития физики и учения об электричестве за первую четверть XIX в. включил С. П. Власова в ряд «превосходнейших физиков» [Л. 9].

К сожалению, до нас дошло лишь немногое из научного наследия Власова. Его труды печатались в журнале «Соревнователь просвещения», запрещенном после разгрома восстания декабристов. На это опальное издание в ту эпоху никто из первых биографов Власова не мог ссылаться.

Н. В. Мартинец
Московский электротехнический институт связи

Литература

1. В. В. Петров. Известие о гальвани-вольтовских опытах. СПБ, 1803.
2. Science Progress, XXXI, № 122, 1936.
3. Отечественные записки, ч. II. СПБ, стр. 191, 1819.
4. С. П. Власов. Главные положения новой теории о сущности и образовании воздушного и искусством возбуждаемого электричества. Отечественные записки, ч. II, стр. 195—201, 1819.
5. С. П. Власов. Мысли о внутреннем составе Земли и прочих явлениях, к тому относящихся. Соревнователь просвещения, ч. XI. СПБ, стр. 3—11, 1820.
6. А. М. Кодд. Гальванические элементы (перевод с англ.). ОНТИ, 1934.
7. Соревнователь просвещения, ч. XV. СПБ, стр. 364—365, 1821.
8. Отечественные записки, ч. VII. СПБ, стр. 382, 1821.
9. И. А. Двигубский. Физика, ч. 1, М., стр. XIII, 1824.

Дискуссии

О ПРИМЕНЕНИИ СХЕМЫ КУМЕТРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ ДОБРОТНОСТЕЙ

(Статья А. В. Нетушила, Электричество, № 11, 1955)

Инж. А. И. АЙЗЕНШТЕЙН
г. София

В статье А. В. Нетушила рассматривается возможность расширения пределов измерения куметра обычной конструкции, принципиальная схема которого приведена на рис. 1 (рис. 1,*а* в статье А. В. Нетушила).

В связи с этой статьей я хотел бы остановиться на двух существенных вопросах: 1) о непригодности обычных формул преобразования и эквивалентности для контуров с большим затуханием; 2) о повышении точности измерения малых добротностей при помощи компенсационного метода настройки.

1. В статье автор преобразует последовательный контур в параллельный, выводит формулу для добротности измеряемого конденсатора, устанавливает на основании эквивалентности контуров и на основании того, что выводы сделаны без каких-либо ограничений, что обе схемы пригодны для измерения малых добротностей. Приведенные автором преобразования соответствуют принятым правилам, однако по-моему контуры нельзя считать эквивалентными.

Резонансная частота параллельного контура не зависит от утечки конденсатора, но зависит от активного сопротивления r индуктивной катушки, наоборот, резонансная частота последовательного контура зависит от утечки R конденсатора, но не зависит от активного сопротивления r индуктивной катушки.

В схеме промышленного куметра КВ-1 измеряемый конденсатор подключается к емкости последовательной цепи. При настройке контура на постоянную частоту генератора необходимо компенсировать не только измеряемую емкость C_x, но и фазное смещение, обусловленное утечкой R_x, что приводит к неправильному измерению емкости C_x.

Определим эквивалентное увеличение емкости C последовательной цепи при шунтировании воздушного конденсатора сопротивлением утечки R (рис. 2,*а*):

$$Z = r + j\omega L + \frac{R\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}}. \qquad (1)$$

Реактивная составляющая

$$x = j\omega L + \frac{1}{j\omega C}\cdot\frac{(\omega CR)^2}{1+(\omega CR)^2} = j\omega L + \frac{1}{j\omega C}\frac{Q^2}{(1+Q^2)}. \qquad (2)$$

Наличие утечки эквивалентно увеличению емкости

$$\Delta C = C\frac{1+Q^2}{Q^2} - C$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

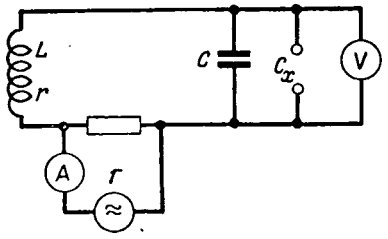


Рис. 1. Принципиальная схема куметра КВ-1 (рис. 1,*а* в статье А. В. Нетушила).

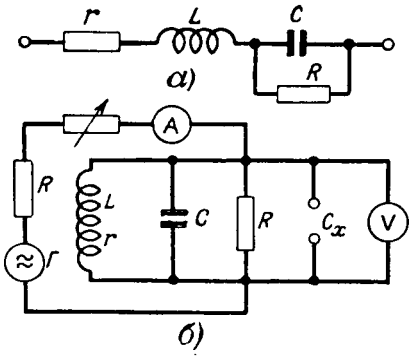


Рис. 2.
а — последовательная цепь при малой добротности конденсатора; *б* — параллельная цепь.

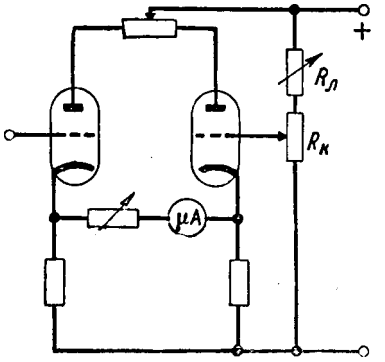


Рис. 3. Принципиальная схема компенсации основного тока при помощи регулируемого сеточного смещения на балансной схеме лампы выходного каскада.

или

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{1}{Q^2}. \qquad (3)$$

При $Q = 3$ $\quad \frac{\Delta C \cdot 100}{C} = 11\%;$

при $Q = 2$ $\quad \frac{\Delta C \cdot 100}{C} = 25\%.$

В статье А. В. Нетушила уравнения преобразования (7) $\left(x_э = \frac{z^2}{x_к}$ и $r_э = \frac{z^2}{r_к}\right)$ относятся к преобразованию простой последовательной цепи, состоящей из $r_к$, L, C, в простую параллельную цепь, состоящую из L, C, $r_э$, и, очевидно, не распространяются на цепи с большими потерями, т. е. на более сложные цепи, например, подобно цепи, приведенной на рис. 2,*а*. Эту цепь надо сначала преобразовать в простую последовательную цепь, потом уже в параллельную.

Из сказанного вытекает, что при измерении малых добротностей следует пользоваться параллельным контуром, так как физически потери полупроводникового конденсатора в основном являются потерями утечки. Применение параллельного контура приводит не только к упрощению математических выкладок, необходимых для вывода формул, но и к упрощению измерений, так как ограничивает число измеряемых величин. При постоянстве тока имеем (рис. 2,*б*):

$$U_1 = IR, \qquad (4)$$

где R — эквивалентное сопротивление цепи.

После подключения C_x с утечкой R_x

$$U_2 = I\frac{RR_x}{R + R_x}; \qquad (5)$$

$$R_x = \frac{1}{I}\frac{U \cdot U_2}{U_1 - U_2}; \qquad (6)$$

$$Q_x = \omega C_x R_x = \frac{1}{I}\frac{U_1 U_2}{U_1 - U_2}\omega\Delta C. \qquad (7)$$

Измеряемые величины: I, U_1, U_2, ΔC.

При определении параметров схемы и генератора надо иметь в виду, что выбор генератора с чрезмерно большим внутренним сопротивлением приводит к необходимости применения весьма чувствительного вольтметра для измерения напряжения U_2. Потому целесообразно при помощи шунтирующего активного сопротивления уменьшить первоначальную добротность Q_1 и выбрать генератор со средним значением внутреннего сопротивления, т. е с достаточно большим током.

2. В статье А. В Нетушила указывается, что затруднением при измерении малой емкости и малой добротности является расплывчатость резонансной кривой, что приводит к большой погрешности. Надо отметить, что компенсационный метод настройки в значительной степени увеличивает точность измерения C_x и таким образом Q_x. Компенсируя основной анодный ток, протекающий через микроамперметр лампового вольтметра, и переключая на большую чувствительность, можно его обратить в «пиковый» гальванометр, действующий подобно нулевому гальванометру. После настройки конденсатора вольтметр опять переключается на меньшую чувствительность, компенсация устраняется и измеряется напряжение U_2.

Пример принципиальной схемы компенсации приведен на рис. 3, где предусмотрено дополнительное регулируемое напряжение, поданное на сетку балансной выходной лампы. Параметры компенсации не являются критическими. Положим, что при настройке вариация измеряемого напряжения $U_2/U_2 = 5\%$. Десятикратное уменьшение основного (анодного) тока, протекающего через микроамперметр, увеличит это соотношение, а тем самым и точность настройки в 10 раз, что более чем достаточно. После настройки возможна повторная компенсация. Пределы точности измерения зависят не только от качества эталонного конденсатора, но и от стабильности генератора по амплитуде и частоте. Целесообразно применение кварцевой стабилизации.

Заключение. Приведенные в статье проф. А. В. Нетушила схемы 1 и 2 нельзя считать эквивалентными, так как использовались упрощенные уравнения преобразования, справедливые лишь при больших добротностях. При определении правильной схемы и погрешности измерения необходимо выявить фактический характер измеряемой величины. Применительно, например, к конденсатору это означает, что в конкретном случае надо выявить существующее соотношение последовательной и параллельной составляющих активного сопротивления конденсатора.

Доктор техн. наук, проф. А. В. НЕТУШИЛ

Сомнения инж. А И. Айзенштейна в допустимости элементарных преобразований электрических цепей, принятых в моей статье, и его обоснования этих сомнений вытекают из двух ошибок, совершаемых им. Такие ошибки уже замечались в работах некоторых экспериментаторов, имеющих дело с куметрами; это собственно и послужило основанием для написания моей статьи.

Первая ошибка заключается в отождествлении условия резонанса в электрической цепи, т. е совпадения по фазе тока и напряжения, с условием максимума напряжений или тока в каком-либо из участков цепи.

Если в цепях с высокой добротностью эти условия весьма близки, то в цепях с малой добротностью они существенно различаются.

В измерителях добротности настройка ведется не по резонансу, а по максимуму напряжения на конденсаторе при вариации его емкости и, следовательно, условием настройки нельзя считать равенство нулю реактивного сопротивления цепи, как это ошибочно полагает инж. А. И. Айзенштейн, ведя расчет по формулам (2) и (3).

Действительно, выразим напряжение на конденсаторе в схеме рис. 2,*а* статьи А. И. Айзенштейна.

$$\dot{U}_c = \frac{\dot{U}}{Z}\frac{R}{1 + j\omega RC}, \qquad (1)$$

где $\dot{U}$ — напряжение источника питания, а Z, R и C соответствуют обозначениям А. И. Айзенштейна.

Максимальное показание прибора (вольтметра, включенного параллельно конденсатору C) имеет место при минимальном значении модуля комплекса

$$Z(1 + j\omega RC) = r + R - \omega^2 RCL + j\omega(L + RCr).$$

Выразив квадрат модуля этого комплекса

$$M = (r + R - \omega^2 RCL)^2 + \omega^2(L + RCr)^2, \qquad (2$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

найдем условие экстремума M при изменении C:

$$\frac{\partial M}{\partial C} = 2\cdot\omega^2 R^2 (r^2 C + \omega^2 L^2 C - L) = 0. \qquad (3)$$

Решая это уравнение относительно ωC, находим:

$$\omega C = \frac{\omega L}{r^2 + (\omega L)^2} = \frac{x_к}{Z^2}. \qquad (4)$$

Легко убедиться, что полученное значение C соответствует минимуму M и максимуму показания прибора

Таким образом, вне зависимости от величины сопротивления R максимальное напряжение на емкости получается при реактивной проводимости конденсатора, равной реактивной проводимости индуктивной катушки L вместе с включенным с ней последовательно сопротивлением r.

Те же выводы получаются на основании преобразования цепей, приведенного в моей статье [формулы (7) и (8)]. Ни о какой систематической погрешности в измерении емкости, которая якобы при $Q = 2$ достигает согласно А. И. Айзенштейну 25%, не может быть речи.

Вторая ошибка заключается в недооценке различия характеристик, получающихся: а) при изменении одного реактивного сопротивления и неизменности частоты и б) при изменении частоты и неизменности остальных параметров цепи.

При измерении добротности имеет место первый случай, для которого вся цепь, за исключением переменного конденсатора, может рассматриваться как некоторый активный двухполюсник, и при любой степени сложности цепи справедливы уравнения преобразования параллельной схемы замещения в последовательную и обратно

$$x_э = \frac{z^2}{x_к} \quad \text{и} \quad r_э = \frac{z^2}{r_к}. \qquad (5)$$

Инж А. И. Айзенштейн совершенно напрасно сомневается в правильности этих выражений и говорит о необходимости до начала измерений знать физическую природу потерь в конденсаторе. Вне зависимости от того, представляет ли измеряемое сопротивление последовательное, параллельное или более сложное соединение активных и реактивных сопротивлений, измерение на куметре дает правильное значение общего комплексного сопротивления двухполюсника при данной частоте.

Иначе обстоит дело при снятии характеристики путем изменения частоты. В этом случае, действительно, и условия максимума напряжения и характер резонансной кривой зависят от физической природы потерь. Именно поэтому при измерении комплексных сопротивлений отдают предпочтение резонансным методам, основанным на изменении одного из реактивных сопротивлений цепи при заданной, неизменной частоте источника.

Рассмотренные выше две ошибки инж. А И. Айзенштейна делают несостоятельной его критику промышленной схемы куметра. Что же касается предлагаемой им схемы (рис. 2,*а*), то она полностью совпадает с рассматриваемой мною схемой (рис. 2) и может быть получена из схемы куметра путем преобразования источника тока в источник э. д. с. и обратно (см. статью автора).

Компенсационный метод снятия расплывчатых резонансных характеристик, рекомендуемый А. И. Айзенштейном, заслуживает внимания и может быть применен в различных схемах куметров.

О ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОМ СРАВНЕНИИ ГОРОДСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

(Статья Б. Л. Айзенберга, Электричество, № 1, 1955)

Инж. С. А. КУДРЯШОВ

Куйбышевское отделение Электропроекта

В статье Б. Л Айзенберга приводится классификация схем городских электрических сетей по степени их надежности и бесперебойности. Нумерация групп этой классификации *не соответствует нумерации категорий потребителей* по степени их ответственности, рекомендованной «Правилами устройства электротехнических установок». Нумерацию групп электрических сетей следовало бы изменить на обратную. Например, к первой группе Б. Л. Айзенберг относит простую разомкнутую сеть, от которой можно питать только неответственных потребителей III категории, поэтому лучше ее и отнести к третьей группе, а не к первой

Классификацию сетей по надежности и бесперебойности электроснабжения следует производить комплексно. В оцениваемый комплекс должны входить распределительная сеть высокого напряжения и сопряженная с ней через сетевые подстанции (ТП) сеть низкого напряжения. Последняя имеет решающее значение при оценке надежности и бесперебойности. Замкнутая сеть низкого напряжения позволяет использовать скрытый резерв мощности трансформаторов с учетом допускаемых перегрузок и пропускной способности разомкнутых линий высокого напряжения первой группы.

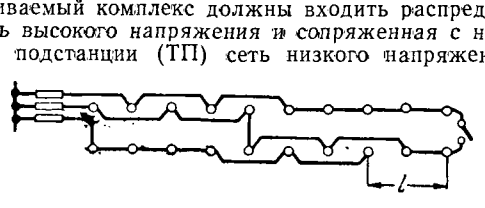


Рис. 1.

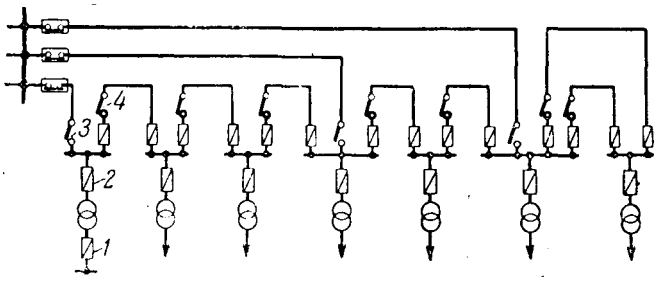


Рис. 2.

Расход меди и общую стоимость второго варианта сети при конфигурации квартала *а* можно снизить. Для этого вместо сети, принятой Б. Л Айзенбергом (см. рис. 3 его статьи), следует взять сеть, представленную на рис. 1; на участке *l* этой сети расход кабеля снижается в 2 раза.

Схема Б. Л. Айзенберга и В. К Косарева (см. рис. 4 рассматриваемой статьи) содержит трехтрансформаторную подстанцию. Такие подстанции в городских сетях встречаются редко, поэтому указанную схему нельзя рассматривать как типовую. Применение на этой подстанции выключателей нагрузки в качестве межсекционных аппаратов недопустимо. Схема в случае ее применения требует большого количества кабеля и аппаратуры Несмотря на наличие на каждой подстанции двух выключателей нагрузки, снять напряжение с шин для выполнения ремонтных работ невозможно.

Взамен схемы Б. Л. Айзенберга и В. К. Косарева мы предлагаем ее модификацию, представленную на рис. 2, которая не имеет перечисленных выше недостатков Действительно, отключив аппараты *1*, *2*, *3* и *4*, мы полностью снимаем напряжение с шин. Кроме того, в случае применения этой схемы длина линий сокращается на 16%, число выключателей нагрузки и предохранителей на 40%.

В своих выводах Б. Л. Айзенберг утверждает, что при переходе от сети первой группы к сети второй группы расход цветного металла увеличивается на 24%, а денежных средств на 14% и что это увеличение незначительно. С этим согласиться нельзя. Конечно, при конфигурации кварталов *а* применять первую группу не следует, так как невыгодно прокладывать рядом две линии и не использовать возможность взаимного резервирования. В технико-экономические расчеты следует включать вариант: разомкнутая распределительная сеть в сочетании с замкнутой сетью низкого напряжения.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Инж. В. А. КОЗЛОВ

Ленинградская кабельная сеть

Известно, что технико-экономические показатели городской распределительной сети определяются ее схемой и местными условиями: плотностью нагрузки, характером потребителей, конфигурацией и размерами застройки и т. д. Это подтверждается практикой проектирования и исследованиями таких специалистов по электрическим сетям, как А. А. Глазунов, И. С Бессмертный и др.

Сеть, выполненная по более сложной схеме, при прочих равных условиях требует бо́льших первоначальных вложений, чем сеть, выполненная по простейшей схеме, так как в первом случае предусматривается больший объем резервирования элементов сети. Именно увеличение первоначальных вложений является тем обстоятельством, которое сдерживает внедрение в городские сети более сложных и вместе с тем более совершенных схем.

С увеличением плотности нагрузки показателей сетей, выполненных по схемам разной сложности, сближаются, что позволяет при определенных условиях применять для городских сетей более совершенные схемы.

Б Л. Айзенберг в рассматриваемой статье считает, что независимо от многообразия местных условий замкнутая схема без сетевых автоматов является не только экономически наивыгоднейшей из аналогичных схем, но и равноценна более простым схемам, с худшими условиями резервирования.

Б. Л. Айзенберг, поставив перед собой цель рассмотреть показатели схем при различных конфигурациях городских кварталов, ограничил свое исследование случаем, когда кварталы имеют одинаковую квадратную конфигурацию и равномерно распределенную нагрузку («идеализированные» кварталы).

Выбор таких условий оправдывается тем, что это будто бы позволяет исключить влияние местных особенностей на окончательные показатели схем. Однако, как уже указывалось выше, опыт проектирования и исследования говорит о том, что зависимость показателей городских электросетей от местных условий является их органическим свойством и, следовательно, стремление исключить влияние местных условий является беспредметным.

Следует указать, что предложение Б. Л. Айзенберга строить сети в виде треугольников как раз и было попыткой использовать условия современного жилстроительства (кварталы с большой площадью зеленых насаждений, с широкими уличными проездами и т. д) для получения более благоприятных показателей замкнутых сетей.

Неудача, постигшая схему «треугольников», предложенную в свое время Б. Л. Айзенбергом, свидетельствует о бесплодности попыток строить сети по каким-то искусственным, симметричным конфигурациям.

«Идеализированные» кварталы в рассматриваемой статье отражают не все многообразие сетевых условий, а только какие-то вполне определенные местные условия. Результаты будут другими, если принять иное расположение и конфигурацию кварталов Следовательно, выводы рассматриваемой статьи не являются общими, а относятся к частному случаю.

Можно отметить ряд неточностей в статье.

Современная застройка с удельной плотностью нагрузки 10...12 тыс. *ква/км*^{2} имеет погонную плотность нагрузки порядка 0,5 ... 0,6 *ква/м*, а «идеализированный» квартал с плотностью нагрузки 0,5 *ква/м* имеет удельную плотность нагрузки всего 6,7 тыс. *ква/м*^{2}. Для «идеализированного» квартала с погонной нагрузкой 0,1 *ква/м*, который должен характеризовать жилстроительство малых городов, принята удельная плотность нагрузки всего 0,5 тыс. *ква/м*^{2}, в то время как удельная плотность нагрузки действительной застройки с такой погонной плотностью достигает 4 тыс. *ква/км*^{2}. Приведенные цифры говорят о том, что «идеализированные» кварталы не отражают условий современного жилстроительства, и, следовательно, выводы рассматриваемой статьи могут относиться только к некоторым случаям существующих сетей в районах старой застройки городов.

Для получения общих выводов относительно целесообразности применения тех или иных схем одни проектировщики идут путем выделения отдельного характерного участка из всего проектируемого района застройки и последующей разработки для него вариантов сетей, построенных по сравниваемым схемам, другие предпочитают производить исследование на примерах типизированных кварталов. В настоящее время, как известно, жилстроительство в Советском Союзе осуществляется по единым строительным и санитарно-техническим нормам. Нам представляется, что на этой основе имеется возможность получить общие выводы в рассматриваемой области жилстроительства. При этом не следует упускать из виду, что подобные исследования являются предварительными и должны выявить лишь общие тенденции изменения показателей сетей, построенных по различным схемам.

Автор рассматриваемой статьи утверждает, что расчет сечения проводов и выбор мощности трансформаторов для сетей третьей группы ничем не отличается от расчета и выбора для сетей второй группы. Это утверждение справедливо в редких случаях. Известно, что в случае полузамкнутой сети (вторая группа) выбор сечения проводов сети низкого напряжения и мощности трансформаторов производится по условному режиму поочередного выхода из работы каждого трансформатора сети, а сечения проводов сети высокого напряжения — по режиму двустороннего питания каждой трансформаторной подстанции. В случае же замкнутой сети сечения проводов сети низкого и высокого напряжения и мощности трансформаторов определяются по реальному режиму выхода из работы группы трансформаторных подстанций. Последний режим более тяжелый и требует иногда больших резервов в элементах сети.

Каждой сети соответствует вполне определенный расчетный режим. Можно сказать, что расчетный режим является одной из характеристик сети. Б. Л. Айзенберг, принимая одинаковые расчетные режимы для сетей второй и третьей групп, лишает эти сети присущих им индивидуальных особенностей. В результате получаемые выводы не отражают действительных свойств различных сетей.

Анализируя принятое в рассматриваемой статье расположение кварталов, можно придти к выводу, что все сети поставлены в более тяжелые расчетные условия против замкнутой сети. Например, при расположении кварталов, представленном на рис. 1,*б* статьи Б. Л. Айзенберга, сети низкого напряжения вариантов 2 и 3 поставлены в равные условия, а для сети высокого напряжения варианта 2 приняты более тяжелые условия. В результате простая сеть имеет худшие экономические показатели. Как видно из табл. 2 упомянутой статьи, полузамкнутая сеть (вторая группа) имеет одинаковую стоимость и больший расход меди по сравнению с замкнутой сетью (третья группа). Наряду с этим расчетные условия для замкнутой сети при конфигурациях кварталов, показанных на рис. 1,*а* и *в*, более тяжелые, чем для сети с автоматическим включением резерва, а расход металла на ту и другую сеть одинаков. Применение сети с автоматическим включением резерва в том виде, в каком она дана в рассматриваемой статье при конфигурации, показанной на рис. 1,*б*, лишено всякого смысла.

Табл. 2 не показывает в полной мере разницы в экономических показателях сравниваемых схем. Например, из таблицы видно, что разница в стоимости простейших нерезервируемых и более совершенных сетей не превышает 35%, а в расходе меди — 25%. Между тем в действительности эта разница достигает большей величины. Данные таблицы говорят о том, что разница в показателях сетей второй и третьей групп находится в пределах точности расчетов, т. е. эти схемы практически равноценны. В то же время автор рассматриваемой статьи указывает, что целесообразно идти на применение более совершенных сетей в том случае, если их первоначальные затраты превышают затраты на более простые сети не более чем на 15 ... 20%. Называя эти цифры Б. Л. Айзенберг тем самым подтверждает, что в действительности может иметь место и более значительная разница в первоначальных затратах, так как при равенстве этих затрат не было бы необходимости регламентировать указанные цифры. (О наличии значительной разницы в первоначальных затратах свидетельствует и практика развития сетей. Несмотря на большое число работ Б. Л. Айзенберга, в которых доказывается целесообразность замкнутых сетей, последние все же не находят широкого применения именно вследствие того, что расход цветного металла и первоначальные затраты на них значительно больше, чем на простые сети.)

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Следует указать, что в статье высказывается ряд положений без всяких доказательств. Например, схема рис. 4 приводится как достаточно известная и не встречающая возражений, в то время как не известно даже, как технически она может быть осуществлена.

Выводы. 1. Разделяя мнение о предпочтительности применения замкнутых сетей, считаем, что по первоначальным затратам и расходу цветного металла они всегда будут уступать простейшим нерезервируемым сетям. Поэтому более широкого их применения следует добиваться путем снижения прямых эксплуатационных расходов.

2. Пределы изменения экономических показателей различных сетей следует анализировать на примерах типизированных кварталов с учетом местных особенностей застройки, а также характерных расчетных режимов для каждой из сравниваемых сетей.

3 Метод «идеализированных» кварталов может быть использован при рассмотрении теоретических вопросов рационального построения горсетей, например определения оптимальной мощности сетевых подстанций и т. д.

Кандидат техн. наук Б. Л. АЙЗЕНБЕРГ
Ленинградский инженерно-экономический институт им. Молотова

Связывать классификацию схем городской сети с нумерацией категорий промышленных потребителей, как это предлагает С. А. Кудряшов, не обязательно, а вообще было бы неверным считать питание электрической нагрузки жилых домов «неответственным».

Замечание С А. Кудряшова о необходимости комплексной классификации распределительной сети по всем ее элементам справедливо. Такая классификация, являющаяся дальнейшим развитием предложенной в рассматриваемой статье, приведена в работе Б. Л. Айзенберга. В. М Дмитриева, Б. А. Константинова и С. Н. Никогосова [Л. 1].

Замечание С. А. Кудряшова о трехтрансформаторных сетевых подстанциях является результатом недоразумения. Замкнутая на стороне 6 (10) *кв* сеть может питать не только сетевые, но и фабрично-заводские подстанции. На рис. 4 рассматриваемой статьи для примера и была показана такая подстанция.

С основным возражением В. А Козлова против предлагаемого в статье метода экономического сравнения схем сети согласиться нельзя. В. А. Козлов считает, что местные особенности являются органическим свойством сетей и исключать их влияние на оценку схем нельзя. Однако именно исключение влияния местных условий было положено в основу работ А. Зенгеля, В. М. Хрущова, «трех авторов» и др. В указанных работах (да и в опубликованных работах В. А. Козлова) исследование экономических показателей производилось для участков «идеализированного» города, а вовсе не на отдельных характерных участках случайной конфигурации, как это рекомендует В. А. Козлов. Такой метод тоже возможен, но для того, чтобы он мог дать сколько-нибудь обоснованные общие выводы, требуется выполнение расчетов на очень большом числе участков самой разнообразной конфигурации Наиболее правильным представляется все же иной путь. Выполнив расчеты для разных схем сети, разных конфигураций кварталов и разной плотности нагрузки на участках «идеализированного» города, следует сопоставить полученные на основании таких расчетов удельные затраты денежных средств и цветного металла с такими же показателями, полученными при выполнении проектов реальной электрической сети.

Анализ удельных затрат цветного металла на распределительную сеть 6(10) *кв* и на сеть 380/220 *в* при разных плотностях нагрузки показал, что полученные в рассматриваемой статье показатели весьма близко совпадают с показателями, полученными при выполнении ряда проектов реальной сети, в том числе и с показателями сетей новых жилмассивов, приведенными в статье В. А. Козлова (Электричество, № 11, 1954).

Например, при погонной плотности нагрузки $D = 0{,}38$ *квт/м* по данным расчетов для «идеализированного» города общая удельная затрата приведенного к меди цветного металла составила для замкнутой сети около 11 *кг/квт*, а по приведенным в статье В. А. Козлова данным реальных проектов — 11,5 *кг/квт*. Общие удельные затраты денежных средств в первом случае составили около 420 *руб/квт*, а во втором — около 400 *руб/квт*.

Ограниченный объем настоящей заметки не позволяет ответить на ряд мелких замечаний В. А. Козлова, хотя и не со всеми этими замечаниями можно согласиться.

Так, вопреки утверждению В. А. Козлова при полузамкнутой сети расход цветного металла на сеть 6(10) *кв* больше, чем при замкнутой, так как загрузка кабелей полузамкнутой сети в условиях нормального режима составляет 50%, а замкнутой — 67...75% и более. Действительно, в отдельных случаях, особенно при неумелом проектировании замкнутой сети, сечение отдельных участков кабеля низкого напряжения по условиям аварийного режима приходится выбирать с излишним запасом. При симметричном же построении сети, принятом в рассматриваемой статье, это не имеет места.

Нельзя согласиться с тем, что затрата денежных средств на замкнутую сеть превышает затрату на простейшую нерезервированную сеть на 25 ... 35%. На деле эта разница обычно меньше. Согласно сообщению представителя Укргипрокоммунэнерго на третьей сессии по городским электрическим сетям эта разница составила от 5 до 12%. Не имеет оснований утверждение о неудаче, якобы постигшей схему «треугольников». Именно эту схему представитель Укргипрокоммунэнерго рекомендовал как наиболее целесообразную.

Резюмируя сказанное, можно прийти к следующим выводам:

1. Предложенная классификация схем городской сети, уточненная в [Л. 1], по нашему мнению, удобна и может быть рекомендована при изучении схем.

2 На «идеализированных» участках города может производиться не только определение наивыгоднейшего числа сетевых трансформаторных подстанций, их мощности и расстояния между ними, но и сравнение экономических показателей распределительных сетей 6(10) *кв* и сетей низкого напряжения с последующей проверкой полученных результатов по данным проектной практики.

Литература

1. Б. Л. Айзенберг, В. М. Дмитриев, Б. А. Константинов и С. Н. Никогосов. Принципы рационального построения городских электрических сетей высокого, среднего и низкого напряжения. Сборник трудов энергетического факультета ЛИЭИ, вып. 14, 1955.

НЕОТЛОЖНЫЕ ЗАДАЧИ ТЕОРИИ ГОРОДСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

(статья А. А. Глазунова, Электричество, № 7, 1956)

Инж. Ю. А. ГЛАНЦ
Харьковское отделение Теплоэлектропроекта

Существующая теория расчета городских электрических сетей очень усложнена и вследствие этого совершенно непригодна для практического применения. Ряд основных положений этой теории устарел, так как сохраняется без изменения в течение нескольких десятилетий, в то время как условия и характер развития городов и их электрических сетей за это время претерпели существенные изменения.

Основным исходным положением существующей методики расчета городских электрических сетей является предположение о равномерном распределении нагрузок по длине улиц. Эта методика, разработанная В. М. Хрущовым [Л 1 и 2] на основе обобщения теории и практики развития городских электрических сетей в первые два-три десятилетия нашего века, вполне соответствовала своему времени, когда городские электрические сети, по существу, только зарождались.

Бытовое электропотребление городов в тот период было развито слабо, а улицы застраивались, как правило, небольшими домами, нагрузки которых мало отличались друг от друга, в район действия каждой сетевой подстан-

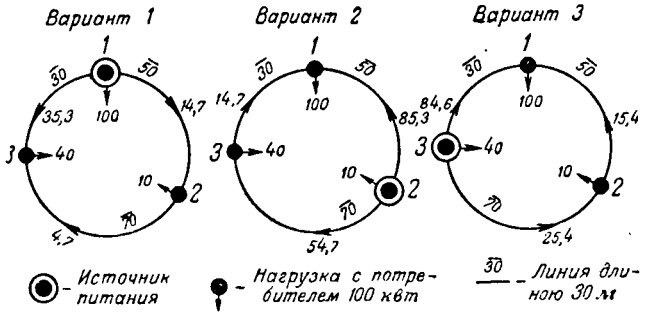
Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ции (ТП) обычно входило большое количество кварталов, поэтому нагрузку сети было естественно рассматривать как распределенную. Как правило, сеть низкого напряжения была воздушной.

Последующий период развития городских сетей характеризуется бурным ростом электропотребления, массовым строительством многоэтажных домов, воздвигаемых часто рядом с домами старой застройки, широким внедрением электропривода в мелкие и коммунально-бытовые предприятия, получающие питание от городской сети. Эти изменения вели к неравномерному распределению нагрузки по длине улиц, резкому сокращению района, обслуживаемого одной ТП. Сейчас зачастую в одном квартале сооружаются несколько ТП; отдельные дома, имеющие большую нагрузку, оборудуются своими ТП, встроенными в здание В сетях низкого напряжения растет удельный вес кабельных сетей. Указанный процесс развития городских электрических сетей можно проследить на примере ряда городов.

Таким образом, сохранившаяся до сих пор методика расчета городских электрических сетей базируется на изжившем себя положении о равномерном распределении нагрузок по длине улиц. В настоящее время такое распределение нагрузок является редким исключением, характерным в основном для участков индивидуальной и малоэтажной застройки.

Различие в подходах к размещению ТП в сети с распределенной и сосредоточенной нагрузкой можно видеть на простом примере кольцевой сети. Если нагрузка распределена равномерно, то при одном источнике питания совершенно безразлично, в какой точке сети поместить этот источник. Совсем иначе обстоит дело, если от той же кольцевой сети питается группа сосредоточенных потребителей. На рисунке представлено три варианта размеще-



ния источника питания в кольцевой сети, от которой питаются три сосредоточенных потребителя с резко различными величинами нагрузок. Расчет, выполненный по правилам потокораспределения в однородной кольцевой сети, показывает, что для варианта *1* суммарный момент нагрузки

$$\Sigma Pl = 14{,}7 \cdot 50 + 4{,}7 \cdot 70 + 35{,}3 \cdot 30 = 2\,123,$$

для варианта *2*

$$\Sigma Pl = 54{,}7 \cdot 70 + 14{,}7 \cdot 30 + 85{,}3 \cdot 50 = 8\,535$$

для варианта *3*

$$\Sigma Pl = 84{,}6 \cdot 30 + 15{,}4 \cdot 50 + 25{,}4 \cdot 70 = 5\,086.$$

В случае питания сосредоточенных потребителей для нахождения экономичного решения требуется значительно бо́льшая конкретизация расчетных условий, чем в случае питания нагрузки, распределенной равномерно вдоль сети. На необходимость такой конкретизации и учета местных условий указывают в своей статье А. А. Глазунов, И. С. Бессмертный и Ф. Ф. Воронцов [Л. 3] Найти оптимальное решение для всей сети с сосредоточенными потребителями при помощи одной формулы, как это предлагается многими авторами, не представляется возможным, так как условия размещения каждой ТП относительно нагрузок будут неодинаковы. Особенно это относится к проектированию сети участков новой застройки, перемежающихся с существующей застройкой, где имеются вполне сложившиеся электрические сети.

Нужно отказаться от распространенного в настоящее время мнения о необходимости выбора одинаковой мощности для всех ТП в пределах расчетного района. Мощность ТП должна определяться степенью сосредоточения нагрузок в том или ином пункте сети. Искусственное уравнивание мощностей ТП во имя однообразия вредно, так как оно приводит к излишним потерям энергии и затратам на сооружение сети. Нужно преодолеть имеющиеся технические затруднения в части выполнения защиты замкнутых сетей при неодинаковой мощности ТП.

Вопрос о выборе однотрансформаторных или двухтрансформаторных ТП должен решаться конкретно, в зависимости от размеров сосредоточения нагрузок, получающих питание непосредственно от ТП, минуя сеть общего пользования. При однотрансформаторной ТП условия резервирования этих нагрузок могут потребовать такого увеличения сечения сети, что дополнительные затраты окажутся выше стоимости установки второго трансформатора.

В городских сетях, так же как и в сетях более высокого напряжения, нет полной идентичности в распределении нагрузок. Необходимо к выбору мощности и размещению ТП подходить более конкретно, учитывая местные условия.

Вместе с этим в городских сетях, как очень распространенных, одни и те же условия часто повторяются, поэтому можно добиться типизации в решении отдельных вопросов. Однако такую типизацию нужно проводить не для всей сети в целом, а для отдельных элементов ее. Для осуществления такой типизации требуется достаточно глубокое изучение характера распределения нагрузок в сети, и это является неотложной задачей ближайшего периода.

Литература

1. В. М. Хрущов. Рациональные основы проектирования электрических сетей. Техническое издательство УССР, 1932.

2. В. М. Хрущов. Электрические сети и линии. Часть первая, местные электрические сети. Госэнергоиздат, 1932.

3. А. А. Глазунов, И. С. Бессмертный и Ф. Ф. Воронцов. Основные положения построения схем городских электрических сетей. Электричество, № 12, 1952.

Инж. Л. М. ФИНГЕР
Гипрокоммунэнерго

Содержащиеся в статье А. А. Глазунова предложения по построению городских электрических сетей представляют несомненный интерес. Однако нельзя полностью согласиться с выводами и рекомендациями автора. Приходится констатировать, что теория городских электрических сетей в статье рассматривается несколько в отрыве от существующей практики строительства сетей; в частности, не затронут весьма существенный вопрос об очередности развития сетей.

Недостаточно убедительны аргументы автора в пользу внедрения сетей 220/127 *в* в районах многоэтажной застройки, так как известно, что расход цветного металла при этом напряжении увеличивается вдвое. Автор несколько преувеличивает удельный вес расхода электроэнергии на освещение в общем расходе на коммунально-бытовые нужды и недостаточно учитывает будущие нагрузки таких бытовых приборов, как холодильники, нагревательные приборы и т. п. Ссылаясь на опыт США, он не учитывает европейскую практику. В европейских странах система напряжений 380/220 *в* принята и для сетей общего пользования районов многоэтажной застройки.

Совершенно правильно замечание автора о том, что проблема планирования перспективных нагрузок городских электрических сетей имеет исключительно большое значение при проектировании. Но, к сожалению, в настоящее время мы не располагаем достаточными статистическими данными о существующей в городах Советского Союза удельной нагрузке на 1 $м^2$ площади пола или на одного жителя. С изучением этого вопроса медлить нельзя.

Нормальным у нас принято считать ежегодный рост нагрузки в пределах 5...15%. По данным зарубежной практики нагрузки городов удваиваются обычно за 10 лет,

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

чему соответствует годовой рост порядка 7%. В наших условиях зачастую могут иметь место отклонения от среднестатистических норм роста нагрузок. В особенности это относится к городам, сильно отставшим в области электрификации, например, по причине отсутствия источников питания достаточной мощности или недостаточной пропускной способности электрических сетей. В таких городах годовой рост коммунальной нагрузки достигает 20% и выше. Кроме того, можно рассчитывать на бурный рост потребления электроэнергии в наших городах в ближайшее время.

Следует учитывать также неравномерность распределения нагрузки и неравномерность роста ее по районам одного и того же города. В центре города ввиду высокого уровня электрификации рост будет минимальным, зато на окраинах и в районах, электрифицированных слабее, можно рассчитывать на резкий скачок нагрузок.

Таким образом, при коротких проектных сроках величина нагрузки сети может быть установлена с достаточной точностью, если предварительно был проведен тщательный анализ существующей нагрузки и реальных перспектив ее роста. При значительном же увеличении пропускной способности сети приходится исходить из более длительных расчетных сроков, что приводит к значительному снижению точности расчетов проектных нагрузок. В этом случае принятое в проекте построение сети должно быть достаточно гибким, допускающим при любых случайных отклонениях в росте нагрузок экономичное осуществление сети.

Прогрессивным можно признать лишь такой метод проектирования сети, который позволяет учесть местные условия и постепенное развитие сети в соответствии с ростом нагрузок.

В зависимости от величины города, отдаленности его от источника питания, величины и распределения нагрузки городская электрическая сеть может быть двух-, трех-, четырех- и т. д. ступенчатой. При нормальном построении сети наращивание ее пропускной способности по мере роста нагрузок должно идти путем постепенного наслоения все новых ступеней системы электроснабжения.

Сети низкого напряжения должны быть, по возможности, выполнены проводом или кабелем одного сечения. С ростом нагрузки должны добавляться новые сетевые подстанции. Таким путем в известной мере можно избегнуть прокладки новых линий низкого напряжения.

Распределительная сеть среднего напряжения (6 или 10 *кв*) при значительном росте нагрузки должна делиться на ряд самостоятельных кустов, для которых создаются центры питания: распределительные пункты или районные подстанции. Этим достигается значительная разгрузка распределительной сети. Когда существующая сеть среднего напряжения становится недостаточной для питания новой нагрузки, следует переходить на напряжение 35 *кв*. Если иметь в виду обычную современную нагрузку городов и нормальный ее рост, то перевод сети на напряжение 110 *кв* может потребоваться лишь в очень больших городах или в крупных промышленных центрах.

Указанным способом затраты на расширение сети могут быть распределены на ряд лет и точно сообразованы во времени с появлением новой нагрузки.

Кандидат техн. наук, доц. С. Н. НИКОГОСОВ
Ленинград

Большинство предположений А. А. Глазунова по проблемам проектирования и построения городских сетей нам представляется правильным и приемлемым; по некоторым из них имеются возражения.

Предложение А. А. Глазунова о необходимости перспективного планирования нагрузок городских электрических сетей своевременно и должно учитываться при проектировании сетей. Неясен вопрос о том, на какой срок развития следует выполнять проект сетей. Мы предполагаем, что при проектировании целесообразно учитывать ожидаемый рост нагрузки сетей на ближайшие 10 лет. При этом следует наметить возможные пути расширения сетей.

Нормы электрических нагрузок США вряд ли применимы в наших условиях. Для установления расчетных электрических нагрузок городских сетей необходимо провести исследование фактических нагрузок возможно большого числа городов СССР и ожидаемого увеличения количества разнообразных электроприемников у населения. Эта работа должна быть выполнена в кратчайший срок.

Анализ величины и динамики роста нагрузки электрических сетей низкого напряжения Ленинграда показывает, что в 1955 г удельная нагрузка на 1 $м^2$ оплачиваемой жилой площади города составляла приблизительно 7,5 *вт* при годовом потреблении электроэнергии в 18 ... 20 *квтч*/$м^2$. Ежегодный рост нагрузки сети составлял 5—7%.

Исходя из указанного при разработке схемы развития городских сетей на 1960 г., Ленинградская кабельная сеть приняла рекомендуемую нормами Министерства электростанций (1950 г.) удельную нагрузку в 10...12 *вт*/$м^2$ оплачиваемой жилой площади (для городов с газификацией быта).

Исследования, проведенные в Ленинграде, показали, что в зимний период телевизоры, имеющиеся в большом количестве у населения, не оказывают заметного влияния на нагрузку городских сетей. Если, несмотря на это, предположить, что после 1960 г. ежегодный рост нагрузки составит 10 ... 15%, то расчетная нагрузка на 1965 г. может составить 20 ... 24 *вт*/$м^2$ оплачиваемой жилой площади. Принятие более высоких норм удельных нагрузок может повлечь за собой неоправданный перерасход значительных денежных и материальных средств.

Следует отметить, что для городских районов с многоэтажными зданиями нормы удельных нагрузок могут быть больше указанных выше за счет большей силовой нагрузки (лифты, насосы и т. д.).

Очевидно, нагрузки городских электрических сетей в основном будут расти за счет большего применения культурно-бытовых электроприборов и развития силовой нагрузки. Относительный рост осветительной нагрузки будет незначительным. Поэтому неблагоприятный к. п. д. ламп накаливания 220 *в* по сравнению с лампами 127 *в* будет сказываться на экономике электрической системы 380/220 *в* все меньше и меньше.

Данные, приведенные в табл. 2 статьи А. А. Глазунова, особенно в части эксплуатационных расходов, весьма условны и не соответствуют действительности.

В целях экономии цветного металла, уменьшения количества сетевых подстанций и удешевления стоимости городских сетей следует применять напряжение 380/220 *в*. Возврат к напряжению 220/127 *в* был бы шагом назад.

Можно безоговорочно присоединиться к мнению А. А. Глазунова о том, что предпочтение следует отдать замкнутым, а не разомкнутым резервированным сетям и что напряжение глубоких вводов высокого напряжения должно выбираться по технико-экономическим показателям.

Из-за исключительно большой стоимости кабельных линий 110 *кв* применение глубоких кабельных вводов этого напряжения целесообразно только при весьма больших плотностях нагрузки. Даже в Ленинграде в ближайшие 10 лет устройство глубоких кабельных вводов 110 *кв* оправдывается лишь в единичных случаях. Устройство же глубоких кабельных вводов 35 *кв* оказывается целесообразным во многих случаях.

В области сетей среднего напряжения необходимо провести дальнейшие исследования и рассмотреть комплексно вопросы о целесообразности сооружения распределительных подстанций и устройства глубоких вводов высокого напряжения.

В связи с ростом нагрузки городов и мощности отдельных агрегатов электрических станций следует, наконец, решить вопрос о введении в шкалу стандартных напряжений дополнительных ступеней. Повидимому, целесообразно принять одну ступень напряжения в диапазоне 15 ... 20 *кв* и вторую 60 *кв*. Внедрение этих ступеней напряжения могло бы в ряде случаев существенно упростить схему сетей и удешевить их стоимость.

Необходимо уделить должное внимание регулированию напряжения городских сетей. Следует установить, в каких точках городской сети необходимо поддерживать заданные уровни напряжения и какими техническими средствами добиваться этого.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

В связи с увеличением количества приключаемых к городской сети токоприемников с низким коэффициентом мощности необходимо исследовать вопрос об ожидаемой величине коэффициента мощности городской сети и наметить пути компенсации реактивной мощности.

Наконец, необходимо обратить должное внимание на расширение и реконструкцию внутридомовых электрических сетей, которые во многих случаях (особенно в крупных городах) весьма перегружены и являются очагами больших потерь энергии и напряжения.

Можно согласиться с мнением А. А. Глазунова, что руководство технической политикой в области электрических сетей больших городов должно осуществляться Техническим управлением Министерства электростанций.

Инж. Н. И. МЕДВЕДСКИЙ
Ленгипрогор

Статья А. А. Глазунова представляет значительный интерес прежде всего в том отношении, что в ней ясно сформулированы основные вопросы, разрешение которых необходимо для успешного развития городских электрических сетей.

Как видно из статьи, основным недостатком в развитии городских электрических сетей является «недоучет значения вопросов городских электрических сетей, наблюдаемый в настоящее время». Это можно иллюстрировать следующим примером.

При разработке проектов детальной планировки городов обязательно рассматриваются водопроводные, канализационные и тепловые сети, но далеко не всегда рассматриваются электрические сети. Такая практика находится в полном соответствии со Справочником укрупненных показателей стоимости проектных и изыскательских работ (часть II), в табл 4 которого вы найдете и водоснабжение, и канализацию, и теплоснабжение, но не найдете электроснабжения.

Нам представляется, что электроснабжение должно быть приравнено к теплоснабжению, канализации и водоснабжению и должно рассматриваться в проектах детальной планировки городов.

Замечания А. А. Глазунова о неправильной методике проектирования городских электрических сетей относятся, повидимому, к сетям не всех городов, а лишь тех, в которых преобладают здания в 5 ... 14 этажей и которых сравнительно немного, так как в настоящее время значительное большинство городов застраивается зданиями не выше пяти этажей. Таких домов присоединяется к одной ТП больше, чем указывается в статье.

Нам представляется правильным высказывание А. А. Глазунова о необходимости уделить больше внимания теории электрических сетей, однако при этом надо предостеречь от «обратной ошибки», т. е. от распространения на сети всех городов выводов, которые будут получены для городов с большой плотностью нагрузки.

А. А. Глазунов вновь возвращается к вопросу о напряжении сетей низкого напряжения, отстаивая при этом напряжение 220/127 *в*. В качестве одного из аргументов в пользу напряжения 220/127 *в* он приводит увеличение нагрузки при замене ламп накаливания напряжением 127 *в* на лампы 220 *в*. Однако этот аргумент справедлив лишь при условии, если исходить из того, что при напряжении 127 *в* выбор ламп накаливания точно соответствует принятой величине освещенности. В действительности это не имеет места, так как точно подобрать лампу, дающую световой поток, обеспечивающий принятую величину освещенности, не представляется возможным из-за прерывистости шкалы выпускаемых ламп. Кроме того, величина светового потока для освещения жилых квартир уже не такая жесткая величина, как для государственных предприятий. Следовательно, при переходе на напряжение 220 *в* вовсе не во всех случаях потребуется замена ламп на более мощные. В ряде случаев мощность ламп будет сохранена без изменения, так как при напряжении 127 *в* она была завышена; в других случаях мощность будет сохранена за счет незначительного снижения светового потока. Конечно, будут иметь место и случаи, когда лампы 127 *в* будут заменены лампами 220 *в* большей мощности. Однако утверждать, что эти последние случаи будут преобладать, нет никаких оснований.

Таким образом, теоретический расчет увеличения мощности ламп с переходом от 127 к 220 *в* не может рассматриваться как убедительное доказательство. Судить об увеличении нагрузок при этом переходе можно только на основании сопоставления действительных измерений потребления энергии в домах, имеющих одинаковые условия, но разное напряжение на лампах.

Нельзя не отметить правильную постановку в статье вопроса о схемах городских электрических сетей.

В настоящее время имеется много не разрешенных вопросов построения городских электрических сетей. По мере развития этих сетей будут вставать все новые и новые вопросы. Решение этих вопросов в ряде случаев уже не под силу эксплуатирующим и проектным организациям. Поэтому необходимо создание научно-исследовательского института, который будет в состоянии разрешать все вопросы, связанные с построением городских электрических сетей и давать правильное направление их развитию.

Кандидат техн. наук Н. В. ВОЛОЦКОЙ
Ленпроект

Правительственные директивы ориентируют нас на застройку городов типовыми домами высотой 2—5 этажей. Даже в Москве в дальнейшем намечено резко снизить число этажей домов новой застройки, так как дома в 8—14 этажей неэкономичны. А. А. Глазунов не учитывает этих решений и ориентируется на застройку городов высотными домами. Отсюда неверен вывод о том, что каждый трансформатор обслуживает 1—3 дома. В действительности каждый трансформатор обслуживает 6—10, а иногда и более зданий, т. е., как правило, мы имеем дело с протяженной сетью низкого напряжения.

Соображения о том, что осветительные установки напряжением 220 *в* требуют большей мощности по сравнению с установками 127 *в*, справедливы, если речь идет о больших производственных помещениях, залах и т. п., где возможны различные варианты в выборе числа и единичной мощности ламп. В жилых же домах число и мощность ламп меняться в зависимости от напряжения практически не будут и применение напряжения 220 *в* приведет лишь к некоторому понижению освещенности. Если же учитывать, что распределительная сеть низкого напряжения имеет значительную протяженность, то преимущества системы 380/220 *в* остаются несомненными.

Проблема планирования перспективных нагрузок имеет большое государственное значение. Прежде всего необходимо внести ясность в определение расчетного срока. Сейчас городские сети проектируются из расчета их развития на 5 лет.

Этот явно недостаточный срок не вызывал до сих пор протестов только потому, что существующие нормативные удельные нагрузки являются завышенными. Например, в новых районах Ленинграда трансформаторы имеют загрузку, равную примерно 50% ее расчетной величины, хотя с момента составления проекта прошло 5—10 лет. Это не означает, однако, что такая же картина будет иметь место и в дальнейшем. Рост нагрузки будет определяться в основном сортаментом и количеством выпускаемых бытовых электрических токоприемников, их ценами и тарифом на электроэнергию. Поэтому нельзя планировать расчетные нагрузки абстрактно, не зная совершенно точно плановых предположений по указанным выше вопросам.

Выбор схемы электрической сети определяется многими, часто весьма своеобразными причинами. Если рассматривать этот вопрос чисто академически, то следует полностью согласиться с А. А. Глазуновым в том, что наиболее совершенными являются замкнутые сети. Однако, как показывает практика Ленинграда, процесс осуществления этих сетей довольно продолжителен и сложен, так как за время с момента разработки проекта сети до ее осуществления в натуре многократно меняются проекты и назначение зданий, схема планировки кварталов, технология строительства и его очередность и т. п. Оперативно откликаться на все эти изменения при замкнутой сети очень трудно. Равным образом неудобно применять замкнутую сеть в случаях, когда проектирование

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ведется не крупными жилмассивами, а небольшими кварталами или группами домов.

Чтобы применять замкнутые сети, необходимо достичь большей устойчивости в архитектурно-планировочных решениях и организации строительных работ, чего, к сожалению, пока еще нет. Поэтому сейчас важнейшим качеством схемы является ее универсальность, эластичность, способность легко видоизменяться в связи с изменением планировки трасс и нагрузок. Ленпроект в настоящее время считает наиболее удобной сеть, в которой применяются ТП с одним трансформатором, двухлучевое питание и автоматическое включение резерва со стороны высокого напряжения, а также разомкнутая схема сети низкого напряжения. Такая сеть значительно дешевле обычной двухлучевой, достаточно надежна и главное универсальна, легко преобразуется и видоизменяется в процессе осуществления проекта

Теоретические основы построения городских электрических сетей, базирующиеся на принципе равномерной погонной плотности нагрузки, нельзя считать сейчас утратившими силу. Как было показано выше, один трансформатор может обслуживать до 10 и более зданий. При застройке кварталов типовыми домами величины нагрузок отдельных домов и расстояния между ними — вполне сопоставимы, ТП должны строиться вне зданий, т. е. все без исключения дома должны питаться от распределительной сети.

На расчет и построение замкнутой сети, правда, влияют такие факторы, как аварийные режимы, селективность защиты и т. п., но все эти вопросы достаточно подробно рассмотрены в литературе. Поэтому сейчас следует говорить, пожалуй, не о создании новой теории электрических сетей, а об усилении теоретических разработок в этой области, направленных на радикальное удешевление сетей. Поставленная правительством задача снижения стоимости строительства относится и к электрическим сетям и можно утверждать, что в этом направлении сделано еще далеко не достаточно.

Кандидат техн. наук И. С. БЕССМЕРТНЫЙ, кандидат техн. наук Ф. Ф. ВОРОНЦОВ

Москва

Рост нагрузок городских электрических сетей повсеместно потребовал их технической реконструкции и поисков наиболее экономичных решений. Поэтому постановка ряда важных вопросов в статье А. А Глазунова вполне своевременна. Весьма желательно, чтобы было реализовано содержащееся в заключительной части статьи предложение о мероприятиях по обеспечению квалифицированного разрешения этих вопросов.

Простое сопоставление замкнутых и разомкнутых резервированных сетей приводит А. А. Глазунова к тому, что он отдает предпочтение первым. Однако в настоящее время нельзя ограничиться таким простым сравнением, не проанализировав тщательно варианты схем с учетом применения новейшего коммутационного оборудования и новейших средств защиты, автоматики и телемеханики, необходимых для выполнения расчетных условий и требований надежности электроснабжения. Кроме того, при значительном числе предложенных в последнее время схем и видов оборудования приходится считаться с комбинированными решениями, сочетающими разные преимущества замкнутой и разомкнутой работы сети.

Опыт применения сложнозамкнутых сетей (сеток) низкого напряжения в США показал, что они требуют больших резервов пропускной способности линий низкого напряжения, т. е. больших затрат цветного металла. Поэтому в городах Западной Европы эти сети не нашли большого распространения. Но там применяются разные виды и варианты замкнутых схем, позволяющие сократить запасы в линиях низкого напряжения за счет резервирования путем аварийных переключений в сетевых подстанциях на стороне высокого или низкого напряжения. Можно отметить, что в последнее время и в США все шире прибегают к схемам местных сеток с резервированием в сетевых подстанциях

Распространение таких схем показывает, что автоматическое резервирование для участков сети, требующих повышенной надежности питания, целесообразно осуществлять в основном по линиям высокого напряжения. В то же время замкнутая работа линий низкого напряжения может представить значительные преимущества в отношении нормальных, а не аварийных режимов работы.

Таким образом, наряду с автоматизацией резервирования питающих сетей высокого напряжения, предусматриваемой новыми Правилами устройства электроустановок, в СССР найдут применение и комбинированные схемы распределительных сетей, замкнутые на низком напряжении, но резервируемые в основном на высоком напряжении с использованием устройств автоматического включения резерва или других средств электроавтоматики.

Все упомянутые схемы повышенной надежности, основанные на применении местной автоматики, используют ее лишь в ограниченных целях — для восстановления питания при коротких замыканиях. Хотя эта задача и является важнейшей в практике эксплуатации сетей, однако ее изолированное решение в упомянутых схемах без учета дополнительных требований нужно признать неполноценным.

Наряду с применением автоматического включения резерва и автоматического повторного включения в питающей сети, в сетях ряда больших городов на распределительных пунктах предусматривается также и телемеханизация с использованием каналов телефонной сети. Однако ее объем определяется теми же ограниченными техническими требованиями и сводится к устройствам телесигнализации иногда вместе с телеизмерением по вызову. Между тем увеличение объема телемеханизации с выполнением телеуправления выключателями позволило бы значительно расширить использование и повысить эффективность телеустройств на распределительных пунктах без большого их усложнения. Это может оказаться необходимым в особых условиях и целесообразным при обычных режимах работы сети.

Так, для ускоренного определения места замыкания на землю в распределительной сети можно использовать последовательное телеотключение и автоматическое повторное включение линейных выключателей с наблюдением за телесигналами. При этом в сетях с малыми емкостными токами или при их компенсации удалось бы избежать известных трудностей отыскания мест замыкания на землю из-за сложности отстройки от «бросков» тока на неповрежденных участках сети и др.

Телеуправление выключателями на распределительных пунктах может быть использовано также для обеспечения наиболее экономичного питания и снижения потерь энергии в нормальных режимах. Например, при двух или более центрах питания в сети города рациональная схема потокораспределения не сохраняется постоянной как по сезонам, так и в течение суток. Поэтому, кроме сезонных переключений, осуществляемых вручную сетевым персоналом, в ряде случаев целесообразны суточные переключения в сети. Такие же периодические переключения целесообразны для переноса места деления между соседними участками сети с различными графиками нагрузки (промышленными и бытовыми), а также с разными возможностями резервирования и другими местными условиями. Это может быть осуществлено без усложнения устройств распределительных пунктов, поскольку применение автоматического включения резерва и автоматического повторного включения и без того обусловливает необходимость включающих приводов к выключателям.

Дальнейшее расширение объема телемеханизации сетей с тем, чтобы охватить ею не только распределительные пункты, но и сетевые подстанции, позволило бы с еще большей эффективностью решать задачи локализации замыканий на землю и обеспечения экономичных режимов. Однако в этом случае неясна целесообразность установки дополнительного оборудования на сетевых подстанциях, хотя и несложного, но многочисленного, и выполнения каналов связи между сетевыми подстанциями и диспетчерским пунктом. Такое расширение объема телемеханизации могло бы быть облегчено, если бы были освоены распространенные за рубежом частотные телесистемы с передачей по занятым каналам, в том числе по электросетям.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Для электрических сетей наших городов характерно питание распределительных пунктов от разных центров питания. При этом не исключено питание от одного источника. В таком случае один распределительный пункт часто питается непосредственно от шин генераторного напряжения, а другой — от того же источника питания, но через электропередачу повышенного напряжения, например, 35 *кв*. В обоих случаях между соседними распределительными пунктами предусматривается нормально разомкнутая аварийная связь.

Обе схемы питания распределительных пунктов в принципе не отличаются друг от друга. Местонахождение точки токораздела в них, определяемое наличием аварийной связи, обычно жестко закреплено и далеко не всегда совпадает с наивыгоднейшим в отношении потерь.

При помощи средств автоматики и телемеханики можно с диспетчерского пункта изменять место нахождения точки токораздела в питающей сети, если, например, в периоды непиковых нагрузок отключать секционный выключатель на одном из распределительных пунктов и одновременно переводить соответствующую секцию шин на питание от другого распределительного пункта по аварийной связи между ними. При определенных условиях такая переброска нагрузок с одного распределительного пункта на другой может быть целесообразна, так как дает значительное снижение потерь электроэнергии в питающей сети.

Исследования этого вопроса, проведенного в общем виде, для сети с двумя распределительными пунктами показывают, что максимальное снижение потерь мощности $\delta P_{макс}$, получаемое от перевода части нагрузки с одного распределительного пункта на другой, зависит преимущественно от соотношения между нагрузками S_1 и S_2, имевшими место до переключения, а также между сопротивлениями $R_{л1}$ и $R_{л2}$ линий 6 или 10 *кв*, питающих эти пункты. Зависимости

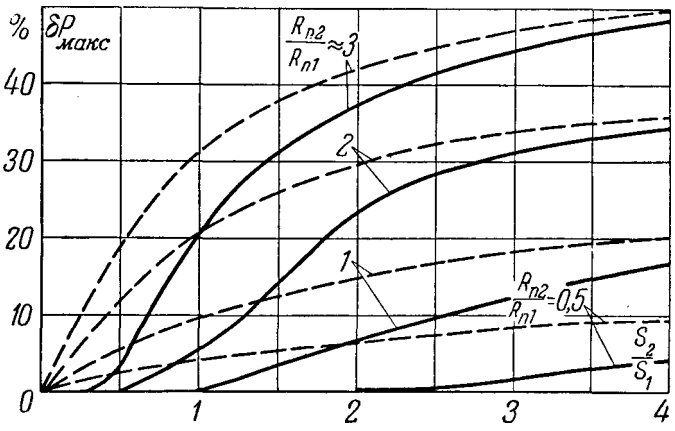
$$\delta P_{макс} = f\left(\frac{S_1}{S_1}, \frac{R_{л2}}{R_{л1}}\right)$$

приведены на рисунке, где сплошными линиями даны кривые для схемы питания двух распределительных пунктов от разных центров питания, а пунктирными—для такой же схемы питания, но при наличии передачи мощности с первого центра питания на второй по линии 35 *кв* с трансформаторами 35/6 (10) *кв*.

Получаемое при переключениях снижение потерь мощности, равное

$$\delta P = \frac{\Delta P' - \Delta P''}{\Delta P'} 100\ [\%].$$

где $\Delta P'$ и $\Delta P''$ — потери активной мощности до и после переключения, зависит также от величины нагрузки, переключаемой с одного распределительного пункта на другой. При определенных значениях этой нагрузки величина δP достигает своего максимума $\delta P_{макс}$.



Если величину переключаемой нагрузки обозначим λS_2 то при отношении $\frac{R_{л2}}{R_{л1}} \approx 3$ получим следующие данные[1]:

Максимальное снижение потерь мощности $\delta P_{макс}$, %	21	37	45	48,5
Переключаемая нагрузка λ в относительных единицах	0,40	0,49	0,53	0,54
Отношение нагрузок распределительных пунктов $\frac{S_2}{S_1}$ до переключения	1	2	3	4

Практически от величины λ, соответствущей $\delta P_{макс}$, можно отступить на $\pm$ 25% ввиду пологости кривых зависимости $\delta P_{макс} = \varphi(\lambda)$ в области максимума.

В зависимости от местных условий могут быть целесообразны либо сезонные переключения, либо суточные, либо те и другие. Суточные переключения эффективны при весьма частых случаях непиковых нагрузок большой продолжительности величиной 70 ... 80% максимума.

Для примера оценки эффективности суточных переключений можно отметить, что в одном конкретном случае телеуправление двумя или тремя выключателями в распределительном пункте позволяет снизить потери энергии на 74 000 *квтч/год*, а дополнительное использование трех выключателей в узловых сетевых подстанциях увеличивает эффект вдвое.

Если принять стоимость потерь 0,15 *руб/квтч*, то экономия только от переключений в распределительных пунктах за восьмилетний срок окупаемости требующегося оборудования составит:

$$0{,}15 \cdot 74\,000 \cdot 8 = 89\,000 \text{ руб.},$$

а от переключений в распределительных пунктах и сетевых подстанциях вдвое больше.

[1] Цифры округлены.

✧ ✧ ✧

Заметки и письма

ОБ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ НОРМАХ ДЛЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Известно, что специфика электротехнических устройств горнодобывающей промышленности (шахт, карьеров, приисков) остается вне компетенции действующих и обязательных для всех отраслей народного хозяйства Правил, утвержденных Министерством электростанций (ПТЭ, ПТБ, ПУЭУ).

Горные электроустановки регламентируются соответствующими разделами ведомственных правил и инструкций [Л. 1 ... 4]. В этих документах, являющихся, по существу, правилами технической эксплуатации или правилами безопасности при производстве горных работ, электротехнические вопросы рассматриваются поверхностно, частью неквалифицированно, и встречаются даже взаимоисключающие рекомендации. Ясно, что это вызывает серьезные затруднения при эксплуатации рудничного электрохозяйства.

Приведем несколько примеров. Параграф 1146 ПТЭ рудников Министерства цветной металлургии [Л. 1] гласит: «Защита от замыкания на землю в подземных подстанциях не обязательна», а в § 1160 тех же Правил рекомендуется противоположная мера: «Для отключения однофазного замыкания на землю масляные выключатели напряжением выше 500 *в*, фидерные автоматы напряжением до 500 *в* и магнитные пускатели должны быть снабжены реле заземления». В Правилах нет четких указаний о возможности и целесообразности применения занулений в шахтах и карьерных сетях, в частности на передвижных электромеханизмах. В вышедших недавно «Единых правилах безопасности» [Л. 4] указано, что в шахтах запрещается применение сетей с заземленной нейтралью транс-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

форматоров и зануление электрооборудования (§ 454). В других, цитированных выше материалах по этому важному вопросу не дано решения. В Правилах отсутствуют нормы на испытания шланговых кабелей, не согласованы сроки испытаний заземляющих устройств, химического анализа трансформаторного масла, залитого в оборудование электрических экскаваторов, и других контрольных поверок. Существенным недостатком ведомственных правил является то обстоятельство, что нормы, относящиеся к подземным электроустановкам, механически распространены на открытые горные работы. При такой унификации норм этот прогрессивный способ добычи руды, получающий все более широкое распространение, лишается определенной доли своих преимуществ, так как в этом случае неоправданно возрастают затраты на электрооборудование и строительно-монтажные работы и усложняется эксплуатация.

В условиях все возрастающей энерговооруженности предприятий горнорудной промышленности возникает настоятельная необходимость в создании общесоюзных Правил (ПТЭ, ПТБ и ПУЭУ), отражающих особенности сооружения и эксплуатации горных электроустановок. Правда, в ведомственных правилах имеются ссылки на то, что к шахтным и карьерным электротехническим устройствам должны предъявляться требования «Правил технической эксплуатации промышленных предприятий». Однако это является ни к чему не обязывающей формальной отпиской, так как органы Госгортехнадзора СССР не принимают во внимание Правил МЭС, а требуют выполнения устаревших и недоработанных ведомственных норм. Представляется, что целесообразнее всего дополнить общие электротехнические Правила надлежащими главами, относящимися раздельно к подземным и открытым горным работам, как это сделано, например, для торфяных или электропечных установок.

Ниже приводятся некоторые соображения, основанные на опыте эксплуатации электротехнических устройств открытых горных работ, которые могут быть использованы при составлении дополнительных разделов общесоюзных электротехнических Правил.

При устройстве и эксплуатации защитных заземляющих устройств для передвижных электроустановок открытых горных разработок руководствуются весьма жесткими нормами отраслевых ПТЭ, согласно которым величина сопротивления заземления не должна превышать 2 *ом*. Несмотря на резкие отличия между условиями работы в шахтах и карьерах, эта норма обязательна для обоих способов добычи ископаемых, что является излишней перестраховкой. Уместно напомнить, что в разделах ПУЭУ МЭС, касающихся вопросов заземлений, оговорка о применении специальных мер, не предусмотренных ПУЭУ, в числе других отраслей народного хозяйства подразумевает именно только «подземные установки горной промышленности». Поэтому на торфоразработках или на крупных строительных площадках, например, где передвижные электромеханизмы эксплуатируются в обстановке, аналогичной имеющейся на открытых горных работах, вполне законно применяются нормы МЭС.

Опыт и литературные данные [Л. 5] показывают, что существует большая группа горных пород, являющихся диэлектриками с удельным сопротивлением $10^4 \dots 10^5$ *ом/см* и выше (апатиты, доломиты, известняки и др.). В таких скальных грунтах сооружение заземляющих устройств, удовлетворяющих норме 2 *ом*, практически недостижимо. Удовлетворительным решением являлось бы дифференциация норм для величины сопротивления заземления в зависимости от электропроводности грунта, однако многочисленность норм привела бы только к усложнению вопроса.

Проектом новых Правил устройства заземлений, составленного по поручению МЭС, уже предусмотрено определенное облегчение для плохо проводящих грунтов [Л. 6]. Хотя в этом проекте также принят принцип отказа от расчетной методики, все же в первом приближении для выбора максимального значения сопротивления заземления карьерных передвижных электроустройств следовало бы принимать во внимание ток замыкания на землю в энергоснабжающей сети и напряжение прикосновения. Известно, что в карьерных сетях напряжением 6 *кв* с незаземленной нейтралью (воздушные линии и гибкие кабели) токи замыкания на землю не превышают 1 ... 2 *а*. В этом случае требования техники безопасности при напряжении прикосновения 40 *в* вполне могут быть обеспечены заземлением с сопротивлением, не превышающим 20 ... 40 *ом*. Для большей гарантии обслуживающего персонала можно узаконить величину 10 *ом*, что приемлемо для любых грунтов.

В тесной связи с нормированием защитных заземлений находится вопрос защиты от замыкания на землю. Карьерные электротехнические устройства по сравнению со стационарными фабрично-заводскими электроустановками находятся в гораздо худших эксплуатационных условиях. Наличие самоходных электромеханизмов и передвижных распределительных пунктов и подстанций с питанием через гибкие шланговые кабели 6 *кв* обусловливает появление частых однофазных замыканий на землю, которые даже при оптимальном сопротивлении заземления могут стать причиной несчастных случаев при возникновении второго замыкания на другой фазе. Для предотвращения опасных двойных замыканий на землю необходимо регламентировать автоматическое быстродействующее отключение поврежденных участков 6 *кв*.

Нашей промышленностью уже освоены разработанные ЦНИЭЛ МЭС комплекты высокочувствительной избирательной защиты от замыканий на землю с реле типа МТР-77. Поэтому надо предусмотреть обязательное оснащение рудничных подстанций защитами указанного вида.

Выпускаемые Министерством электропромышленности гибкие шланговые кабели на напряжение 6 *кв* с металлической заземляющей оплеткой марки ГТШ оказались неудовлетворительными при работе в тяжелых условиях экскавации скальных грунтов. Недостатком этих кабелей является недолговечность оплетки, которая через 6 ... 8 мес. эксплуатации выходит из строя, вследствие чего нарушается заземление экскаваторов или других механизмов. Указанного недостатка лишены гибкие кабели с четвертой заземляющей жилой марки КШЭ (или КШВГ), которые не вызывают нареканий в течение многих лет использования.

Поскольку кабели ГТШ конструктивно не оправдывают себя, следует запретить их применение на открытых горных работах и рекомендовать для питания экскаваторов и других электрифицированных передвижных машин гибкие кабели с заземляющей жилой. Строительная длина гибких кабелей 3 и 6 *кв* равна 125 *м*, что не обеспечивает маневренности электромеханизмов. Сращивание отдельных отрезков кабелей производится различными способами — вулканизацией, соединением при помощи муфт и переходных коробок и т. д. Практика производства горных работ на поверхности показала, что глухое счаливание кабелей нецелесообразно, так как частые перемещения экскаваторов по забою вызывают необходимость изменения схем питания, а следовательно, переразделки кабельных соединений с соответствующим укорочением или удлинением кабельных линий. Ясно, что оперативная гибкость кабельных разводок может быть получена только при помощи высоковольтных кабельных коробок, позволяющих с наименьшей затратой времени и труда выполнять в полевых условиях все необходимые переключения. Однако вопреки положительным результатам эксплуатации указанный способ соединений гибких кабелей не нашел официального признания, и рудничные электрослужбы применяют его на свой риск, пользуясь кустарными конструкциями. В предлагаемых новых разделах Правил необходимо отобразить методы сращивания гибких кабелей и вообще весь комплекс вопросов, связанных с их эксплуатацией (нормы и периодичность испытания повышенным напряжением, способы прокладки и т. д.).

Необходимо определить целесообразность заземления нейтрали трансформаторов 6/0,4 *кв*, установленных на крупных экскаваторах. Поскольку по этому вопросу нет единого мнения, то заводы-изготовители его решают поразному. Отечественные шагающие экскаваторы имеют схему с изолированной нейтралью, а механизмы некоторых иностранных фирм (Шкода, Менк) работают в режиме заземленной нейтрали. При соединении нулевой точки обмотки низшего напряжения трансформатора с корпусом экскаватора создаются благоприятные условия для отключения электрооборудования от сети при аварийном замыкании на корпус. Следует, однако, отметить, что отключение не всегда может быть быстродействующим. С другой стороны, для уменьшения случаев элек-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

тротравматизма при пробое изоляции эксплуатация установок с изолированной нейтралью является наиболее приемлемой, что и учтено в цитированных «Единых правилах безопасности» (§ 454). Заманчивым является рекомендация проекта новых Правил устройства заземлений по применению защитного отключения в передвижных электроустановках, однако это предложение может получить широкое распространение только после всесторонней проверки в эксплуатационных условиях.

Литература

1. Правила технической эксплуатации рудников, приисков и шахт, разрабатывающих месторождения цветных, редких и благородных металлов. Металлургиздат, 1948.

2. Правила технической эксплуатации при разработке угольных месторождений открытым способом. Углетехиздат, 1949.

3. Правила безопасности для работ в карьерах, подконтрольных Государственной горно-технической инспекции при Совете Министров РСФСР, Стройиздат, 1954.

4. Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений подземным способом. Металлургиздат, 1955.

5. А. С. Братухин. Заземления в условиях диэлектрических пород. Горный журнал, № 3, 1955.

6. М. Р. Найфельд. О проекте новых Правил устройства заземлений. Промышленная энергетика, № 1, 1956.

Инж. Г. К. Цверава

Бокситогорск

ОТ РЕДАКЦИИ

В статье поднят заслуживающий внимания вопрос. С этим согласно Техническое управление МЭС СССР, которое готово продолжить начатую в прошлые годы совместно с заинтересованными министерствами работу по составлению электротехнических норм для горнодобывающей промышленности, для установок электротяги на железных дорогах и пр. Эти нормы могут быть включены в качестве соответствующих глав в «Правила устройства электроустановок».

Редакция обращается к Министерству строительства предприятий угольной промышленности, Министерству строительства предприятий металлургической и химической промышленности, Министерству путей сообщения с предложением завершить совместно с Министерством электростанций разработку и издание соответствующих электротехнических правил для руководства ими в проектных и строительно-монтажных организациях и на предприятиях.

✧ ✧ ✧

По страницам технических журналов

ОБЛЕГЧЕННЫЕ ПЕРЕДВИЖНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

В Англии фирмой Петбоу разработана передвижная электростанция мощностью 50 *ква* (рис. 1) с газовой турбиной и синхронным саморегулирующимся генератором [Л. 1 ... 4]. Станция весит 544 *кг*, тогда как электростанция такой же мощности обычной конструкции с дизелем весит 2 722 *кг*. Основное снижение веса достигнуто за счет применения газовой турбины, которая при мощности 60 *л. с.* весит всего 54,4 *кг* (выпускает фирма Ровер).

Турбина и генератор смонтированы внутри трубчатой стальной рамы. Там же расположены бак для горючего на 91 *л* и панель управления, на которой размещены вольтметр, частотомер, главный выключатель, плавкие вставки и лампы, сигнализирующие о перегрузке. Пуск станции производится вращением заводной рукоятки.

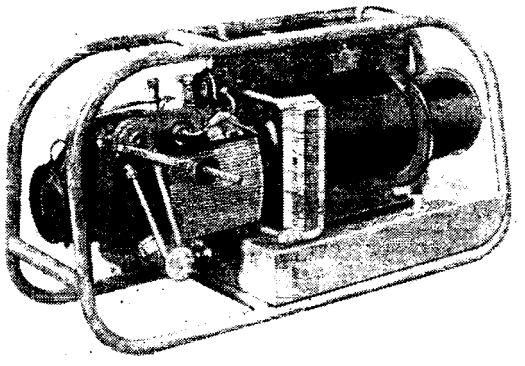


Рис. 1. Общий вид электростанции фирмы Петбоу мощностью 50 *ква* с газовой турбиной.

Газовая турбина применена простейшего типа: одновальная, одноступенчатая с центробежным компрессором. Скорость вращения ротора турбины в номинальном режиме составляет 47 000 *об/мин*; ее снижение до требуемых 3 000 *об/мин* производится через одноступенчатый редуктор. Турбина при помощи фланца крепится к генератору, который служит основанием всей станции. Данная конструкция турбины рассчитана на дизельное топливо, но в будущем предполагается использование любого жидкого или газообразного горючего.

Синхронный трехфазный генератор имеет возбудитель, выполненный по типу электромашинного усилителя с поперечным полем (рис. 2). Это — четырехполюсная машина, имеющая две пары щеток, из которых одна замкнута накоротко, а другая через компенсационную обмотку питает обмотку полюсов генератора. Полюса возбудителя выполнены шихтованными для уменьшения потерь и времени регулирования до 0,12 *сек*. На них расположены две обмотки, которые питаются током через выпрямитель от зажимов генератора. В цепь выпрямителя со стороны переменного тока включены сопротивление для компенсации температурных влияний и реостат для установки уровня регулируемого напряжения. Синхронный генератор с таким возбудителем автоматически поддерживает напряжение с точностью $\pm$ 2,5% при всех нагрузках вплоть до номинальной с коэффициентом мощности 1...0,8 и при изменении скорости вращения первичного двигателя на 4%. При работе с газовой турбиной достигается регулирование напряжения при неизменном коэффициенте мощности с точностью +0,5%, так как изменение скорости вращения турбины от холостого хода до полной нагрузки не превышает 2%. Благодаря принятой системе регулирования и наличию специальной обмотки индуктора генератор этого типа может быть легко включен на параллельную работу с генератором подобного же типа. При этом нагрузка распределяется пропорционально номинальным мощностям генераторов более точно, чем в обычных системах. Генератор не может быть поврежден при коротких замыканиях в главной цепи или разрывах в цепи

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

возбуждения, так как при этом напряжение на зажимах генератора быстро падает до нуля.

Мощность, отдаваемая электростанцией, и расход топлива сильно зависят от окружающей температуры (рис. 3). При +22° С и отдаваемой номинальной мощности 40 *квт* потребляется 48 *л/час* дизельного топлива при удельном расходе 1,25 *л/квтч*. При +50° С отдаваемая мощность снижается до 26 *квт*, а удельный расход топлива повышается до 1,65 *л/квтч*. Большой удельный расход топлива является существенным недостатком газовой турбины данного типа и данной мощности; он превышает удельный расход топлива в дизеле такой же мощности примерно в 4 раза.

В ФРГ фирма АЕГ выпускает электростанции мощностью 10 и 17 *ква* на базе четырехтактного, четырехцилиндрового бензинового двигателя с воздушным охлаждением, уже давно используемого в промышленности (рис. 4). Представляет интерес самовозбуждающийся и саморегулирующийся генератор, применяемый на этих станциях. Он возбуждается [Л. 6, 7] подобно генератору постоянного тока с параллельным возбуждением переменным напряжением от остаточного магнетизма через дроссели $Д_1$, $Д_2$ и $Д_3$ с воздушным зазором и выпрямитель B_1 (рис. 5). Ток дросселя $I_д$ обусловливает создание тока I_B и возбуждение ненагруженного генератора. При нагрузке с током $I_д$ геометрически складывается добавочный ток I_T от трансформаторов тока T, пропорциональный по величине и совпадающий по фазе с током генератора I (рис. 6). Этим компаундирующим устройством, реагирующим на коэффициент мощности нагрузки, осуществляется грубое регулирование напряжения генератора с точностью ±3%.

Дополнительное воздействие на компаундирование для повышения точности регулирования производится при помощи магнитного усилителя. В схеме имеется очень сильно насыщенный дроссель $Д_4$ с воздушным зазором. Он подключен к одной из фаз генератора через автотрансформатор AT. Управляющий ток этого дросселя резко изменяется уже при отклонении напряжения генератора на 1% заданной величины. Он воздействует после выпрямления в B_2 на индуктивность трансформаторов тока T, протекая по управляющим обмоткам этих трансформаторов и изменяя тем самым величину добавочного тока I_T.

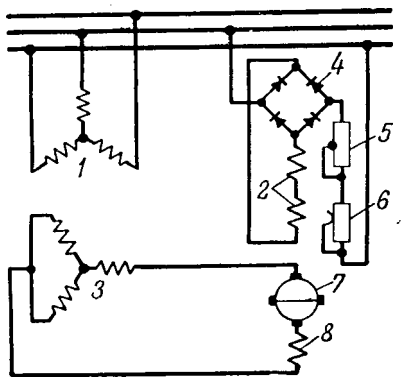


Рис. 2. Электрическая схема генератора станции фирмы Петбоу.

1 — фазная обмотка генератора; *2* — обмотки полюсов возбудителя; *3* — обмотка полюсов генератора; *4* — выпрямитель; *5* — компенсационное сопротивление; *6*—реостат установки напряжения; *7*—якорь возбудителя; *8* — компенсационная обмотка.

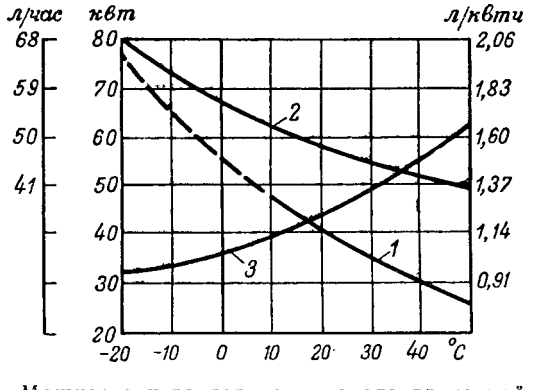


Рис. 3. Мощность и расход топлива электрической станции фирмы Петбоу в зависимости от температуры окружающей среды.

1 — мощность, *квт*; *2* — расход топлива, *л/час*; *3* — удельный расход топлива, *л/квтч*.

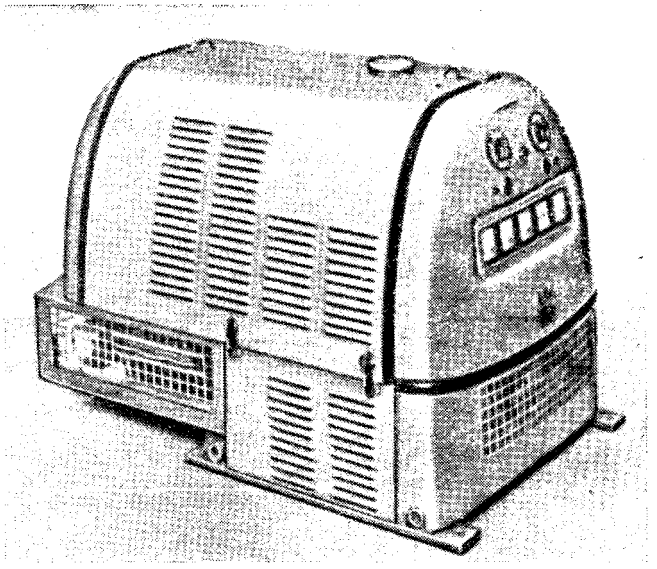


Рис. 4. Общий вид электростанции мощностью 10 *ква* фирмы АЕГ.

Помимо увеличения точности регулирования, это дополнительное устройство существенно увеличивает быстроту и устойчивость самовозбуждения генератора благодаря автоматическому повышению напряжения генератора в момент самовозбуждения, как это происходит в регуляторах вибрационного типа.

Компенсация влияния изменения скорости вращения первичного двигателя (частоты генератора) на напряжение генератора осуществляется при помощи реостата r_1. Изменение этого сопротивления приводит к изменению крутизны характеристики намагничивания дросселя $Д_4$, а следовательно, и величины приращения управляющего тока I_y в трансформаторах тока в том же интервале изменения частоты. В обычном диапазоне изменения частоты порядка 3...5% от холостого хода до полной нагрузки можно подобрать такое сопротивление, при котором влияние частоты на напряжение будет минимальным.

При помощи этих дополнительных к основному компаундированию устройств удается получить точность регулирования напряжения в пределах ±1...2% в современных сильно используемых машинах независимо от нагрузки (в пределах номинала), коэффициента мощности нагрузки, колебаний скорости вращения первичного двигателя и изменения температуры. Последнее компенсируется почти полностью тем, что сопротивление обмотки возбуждения много меньше, чем сопротивление дросселей $Д_1$, $Д_2$ и $Д_3$.

Вместе с тем сохраняются достоинства, присущие компаундированию,— быстрота и апериодичность переходных процессов, что для маломощных установок особенно важно при питании электродвигателей соизмеримой мощности. При сбросе и набросе полной нагрузки переходный апериодический режим длится всего 0,1...0,2 *сек*.

Параллельная работа с сетью или генераторами подобного же типа осуществляется при помощи обычного устройства, состоящего из трансформатора тока T_4 и сопротивления r_2. Падение напряжения на r_2 суммируется с напряжением генератора в измерительной цепи регулировочного дросселя $Д_4$, и, таким образом, создается некоторый статизм внешней характеристики генератора, необходимый для устойчивой параллельной работы.

Автотрансформатор AT имеет отводы, при помощи которых можно изменять уставку напряжения при одиноч-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

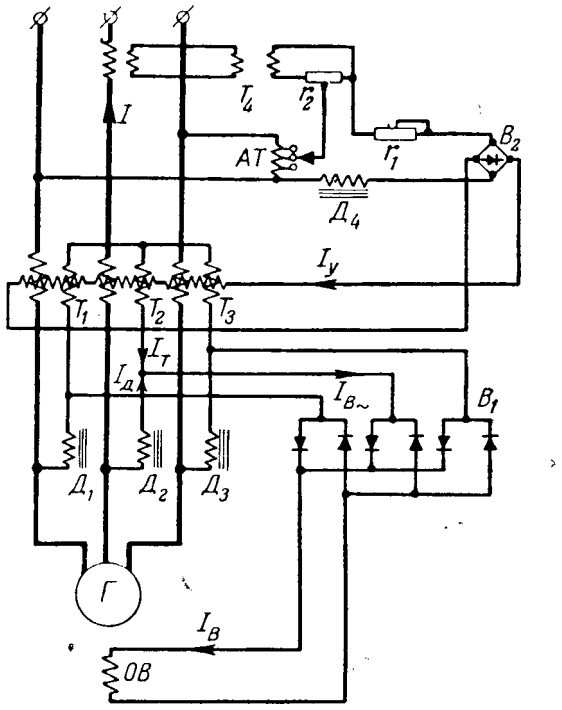


Рис. 5. Принципиальная схема самовозбуждающегося генератора фирмы АЕГ с автоматически регулируемым компаундированием.

ной работе или величину реактивного тока при параллельной работе.

Самовозбуждающиеся синхронные генераторы без машинных возбудителей находят все более широкое применение в небольших передвижных и стационарных установках, так как они существенно сокращают габариты агрегата и упрощают его обслуживание. Искания по усовершенствованию подобных генераторов непрерывно продолжаются. Во Франции недавно запатентован самовозбуждающийся генератор с динамическим трансформатором вместо токосъемных колец и щеток в цепи возбуждения [Л. 8]. Первичная неподвижная обмотка *5* этого трансформатора питается от обмотки статора генератора *2* и помещена на специальном сердечнике рядом с этой обмоткой (рис. 7). Вторичная вращающаяся обмотка *4* укреплена на валу ротора и питает через селеновый выпрямитель *3* обмотку возбуждения генератора *1*. Между цепью статора и первичной обмоткой трансформатора включается аппарат *6* для регулирования тока возбуждения, например магнитный усилитель.

Преимущества подобной системы, помимо отсутствия машинного возбудителя, заключаются в следующем: в машине полностью отсутствуют какие-либо трущиеся электрические контакты в виде щеток, коллектора или колец, что повышает надежность машины, удешевляет и упрощает ее эксплуатацию, исключает возникновение радиопомех; динамический трансформатор позволяет более просто подобрать оптимальное напряжение для цепи возбуждения; выпрямители могут быть выбраны меньших размеров благодаря лучшему охлаждению их при вращении [1]. Такие генераторы, помимо передвижных станций, рекомендуется применять во взрывоопасных и пожароопасных помещениях, а также на самолетах, где в обычных генераторах на больших высотах наблюдается форсированный износ щеток.

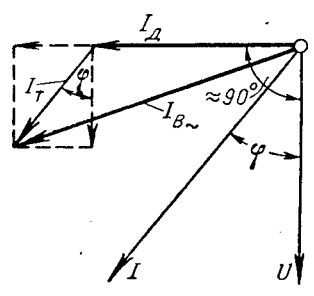


Рис. 6. Диаграмма токов (к схеме рис. 5).

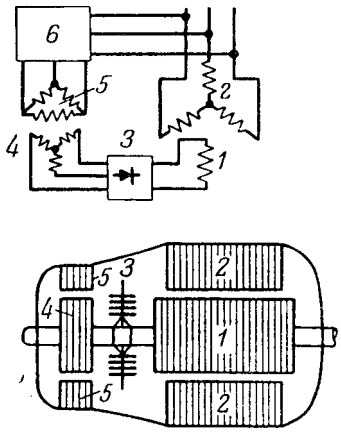


Рис. 7. Схема самовозбуждающегося генератора с динамическим трансформатором.

Литература

1. Brit. Engng, т. 38, стр. 66, № 2, 1955.
2. Petroleum, т. 18, стр. 309, № 8, 1955.
3. Mach. Lloyd. Overseas Ed., т. 27, стр. 93, № 15, 1955.
4. Engineering, стр. 636, № 4660, 1955.
5. A. Rau. AEG-Mitt., стр. 262, № 3/4, 1955.
6. A. Lang. AEG-Mitt., стр. 59, № 1/2, 1955.
7. A. Lang. ETZ-A, стр. 353, № 10, 1955.
8. E. Remy. Rev. Gén. Electr., стр. 113, № 3, 1955.

Инж. И. В. Тихомиров

[1] Вентилируемое размещение выпрямителей в машинах подобного типа было впервые предложено в СССР С. Б. Юдицким еще в 1940 г.

ЗАЩИТА И АВТОМАТИЧЕСКОЕ ПОВТОРНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

В воздушных распределительных сетях ряда зарубежных стран находят все большее применение специальные линейные выключатели и предохранители повторного действия, осуществляющие защиту и автоматическое повторное включение линий. За последние несколько лет для целей секционирования и защиты нашли применение также секционирующие автоматические выключатели нагрузки. Ниже приводится описание основных схем защиты, выполняемых при помощи различных аппаратов в распределительных сетях США напряжением 2...20 *кв*.

Для защиты низковольтных потребительских установок, как правило, применяют предохранители и выключатели, снабженные тепловой защитой. Действие этих устройств согласовывается с защитой потребительских трансформаторов. На стороне низшего напряжения потребительских трансформаторов устанавливают либо предохранители, либо выключатели. Предохранители находят меньшее применение, так как они не позволяют полностью использовать кратковременную перегрузочную способность трансформаторов. Если же выбранная вставка допускает перегрузку трансформатора, она может не отключить удаленные короткие замыкания и плохо согласовывается с предохранителем на стороне высшего напряжения при близких коротких замыканиях.

На вторичной стороне комплектных трансформаторов обычно устанавливают специальный выключатель, который имеет как максимальную токовую защиту, так и защиту от перегрева масла. Характеристики защиты этого выключателя допускают безопасную перегрузку трансформатора и в то же время обеспечивают быстрое отключение коротких замыканий.

Защиту потребительских трансформаторов со стороны высокого напряжения обычно осуществляют предохранителями в различном исполнении. Для защиты комплектных трансформаторов применяют встроенный предохранитель, характеристика плавкой вставки которого на заводе согласовывается с действием выключателя на стороне низкого напряжения. Для защиты обычных трансформаторов применяют пристроенные предохранители.

В американской литературе предохранитель часто характеризуется величиной так называемого защитного коэффициента, равного отношению номинального тока вставки к полному рабочему току защищаемого элемента. Величина защитного коэффициента предохранителей на стороне высокого напряжения трансформаторов колеблется в широких пределах и составляет, по данным одного из опросов, от 1 до 15. Однако около 82% опрошенных по-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

требителей принимают эту величину равной 1...7 при среднем значении, равном 3. Попутно отметим, что примерно такое же среднее значение защитного коэффициента имеют наши отечественные предохранители ПК, применяемые для защиты трансформаторов мощностью 10...50 *ква*.

Выбор более низких значений защитного коэффициента является попыткой обеспечить защиту трансформатора как от перегрузки, так и от коротких замыканий. При этом, как правило, не используется его перегрузочная способность. В американской практике последних лет наблюдается тенденция к применению предохранителей с более высокими защитными коэффициентами. Это объясняется тем, что вероятность повреждений трансформаторов вследствие длительных перегрузок или удаленных коротких замыканий на вторичной стороне мала, и более существенное значение имеет использование их перегрузочной способности.

Пределы номинальных токов вставок, выбираемых для защиты распределительных трансформаторов, обычно определяются следующими соображениями. Минимальный ток вставки определяется степенью используемой перегрузочной способности трансформатора и необходимостью согласования характеристики этой вставки с действием защитных устройств на стороне низкого напряжения трансформатора. Максимальный ток вставки определяется наибольшим значением тока при коротком замыкании на стороне низкого напряжения, который трансформатор может выдержать без повреждения, и необходимостью согласования действия предохранителя со следующим защитным устройством со стороны системы.

В качестве защитных устройств на распределительных линиях применяют линейные выключатели, секционирующие автоматические выключатели нагрузки и предохранители.

Линейные выключатели представляют собой комплектные коммутационные аппараты, рассчитанные на отключение аварийных токов. Особенностью этих аппаратов является наличие встроенных максимальной токовой защиты и механизма, обеспечивающего несколько автоматических повторных включений после возникновения короткого замыкания.

Линейные выключатели, применяемые в настоящее время, рассчитаны в большинстве случаев на выполнение трех автоматических повторных включений. Если повреждение не ликвидировалось, то после третьего АПВ выключатель окончательно отключается. В зависимости от настройки все отключения могут производиться как с выдержкой времени, так и мгновенно. Наличие регулируемых элементов выдержки времени облегчает согласование действия ряда последовательно включенных выключателей. Так, например, выключатель, расположенный ближе к источнику питания, может быть отрегулирован так, что он не будет действовать, пока ближайший к месту повреждения выключатель совершает свой цикл операций, включая конечное отключение.

Применение линейных выключателей дает возможность обеспечить так называемую перекрывающую защиту предохранителей, расположенных за выключателем со стороны нагрузки. Другими словами, при использовании линейных выключателей имеется возможность повысить эффективность действия плавких предохранителей за счет применения ускорения действия защиты выключателей до АПВ. В этом случае при возникновении короткого замыкания за предохранителем, находящимся в зоне ускоренной защиты выключателя, происходят одно-два отключения этого выключателя без выдержки времени. В результате отключения выключателя под действием ускоренной защиты аварийный ток не успевает в какой-либо серьезной степени повредить вставку предохранителя. После каждого отключения происходит автоматическое повторное включение выключателя. Если замыкание ликвидировалось, возобновляется нормальная работа линии. Если же короткое замыкание является устойчивым, последующие отключения происходят с выдержками времени, достаточными для перегорания предохранителя, за которым произошло короткое замыкание. Таким образом, предохранители перегорают только в относительно редких случаях при устойчивых коротких замыканиях.

Секционирующие автоматические выключатели нагрузки представляют собой коммутационные аппараты, действующие совместно с линейным выключателем и снабженные счетчиком операций выключателя. Они настраиваются таким образом, чтобы отключать цепь во время второго или третьего отключения выключателя. При наличии нескольких ответвлений можно применить два последовательно включенных автоматических выключателя нагрузки. При этом автоматический выключатель нагрузки, ближайший к линейному выключателю, настраивается на отключение при третьем отключении выключателя, а более удаленный выключатель нагрузки отключается при втором отключении. Секционирующие выключатели нагрузки имеют ту же уставку по току, что и работающий совместно с ними линейный выключатель.

Следует отметить, что при появлении коммутационных аппаратов с повторным включением широко рекламировалось увеличение числа повторных действий этих аппаратов как универсальное средство повышения числа успешных АПВ. Однако опыт эксплуатации подтвердил целесообразность использования во многих случаях устройств с однократным АПВ, нашедших широкое применение в СССР. Это подтверждается, в частности, использованием секционирующих выключателей нагрузки, срабатывающих при втором отключении выключателей, что, по сути дела, означает отказ от использования увеличенного количества повторных действий для повышения числа успешных АПВ. Повышенное количество повторных действий в ряде случаев может быть целесообразно не только для увеличения числа успешных АПВ, но и для лучшего согласования ряда последовательно включенных защитных устройств.

В 1952 г. один из подкомитетов Американского института инженеров-электриков произвел опрос, касающийся применения различных коммутационных аппаратов во вторичных цепях распределительных подстанций мощностью 5 000 *ква* и ниже, питающих пригородных и сельскохозяйственных потребителей. Ответы на вопросник, включавший 11 вопросов, были получены примерно от 100 компаний, эксплуатирующих в общей сложности около 9 000 подстанций. Полученная информация касается применения в сельских и пригородных сетях следующих устройств (обозначения в скобках соответствуют принятым в дальнейшем сокращениям): предохранителей однократного действия (П), выключателей с ручным приводом, позволяющих осуществить ручное повторное включение (ВРПВ), выключателей с автоматическим повторным включением (ВАПВ), предохранителей двукратного и трехкратного действия (ППД), однофазных линейных выключателей (1ЛВ) и трехфазных линейных выключателей (3ЛВ).

Следует отметить, что результаты опроса были сгруппированы отдельно для подстанций компаний и для подстанций так называемых «кооперативов» по сельской электрификации. При напряжении свыше 3 *кв* последние осуществляют распределение электрической энергии исключительно по четырехпроводной смешанной системе, а общее количество подстанций «кооперативов», по которым имеются данные, составляет 385 против 8 561 подстанции компаний. Поэтому данные по «кооперативам» представляют меньший интерес.

Из 78 опрошенных компаний лишь 1 не применяет на своих распределительных подстанциях автоматических устройств (ППД, ВАПВ или ЛВ) и 10 компаний не применяют этих устройств вдали от подстанций, т. е. для секционирования распределительных линий.

В табл. 1 приведены данные об относительном применении различных автоматических и ручных устройств на подстанциях разной мощности.

Из табл. 1 следует, что общее количество применяемых автоматических устройств примерно в 3 раза больше числа ручных устройств. Однако на подстанциях мощностью до 1 000 *ква* большое распространение имеют и ручные устройства, в частности предохранители. На подстанциях мощностью свыше 1 000 *ква* наиболее часто применяются выключатели с АПВ (ВАПВ).

В вопроснике имелся специальный вопрос о причинах преимущественного применения выключателей с АПВ по сравнению с другими автоматическими устройствами. Наиболее часто упоминаемой в отчетах причиной являются повышенные номинальный и отключаемый токи выключателей. Кроме того, применение выключателей с АПВ позволяет осуществлять более совершенные схемы релейной защиты, выключатели обладают высокой общей надежностью и более легко регулируются и ремонтируются. В вопроснике рассмотрены также условия применения пре-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Таблица 1

Мощность подстанции, *ква*	Количество применяемых устройств в процентах числа трехфазных комплектов						Общее количество трехфазных комплектов	Общее количество подстанций
	ППД	ЛВ	ЗЛВ	ВАПВ	П	ВРПВ		
500 и ниже	11	11	6	12	50	10	1 843	2 175
501 . . . 1 000	7	10	10	34	28	11	2 747	1 977
1 001 . . . 1 500	11	15	3	53	11	7	2 353	1 210
1 501 . . . 2 000	5	2	3	62	18	10	1 446	809
2 001 . . . 3 000	4	4	1	75	6	10	3 354	1 347
3 001 . . . 5 000	1,3	1,2	0,5	81	2	14	3 543	1 043
Итого . . .	6	6,5	3,5	57	16	11	15 286	8 561

дохранителей повторного действия и линейных выключателей — однофазных и трехфазных. Несмотря на то, что предохранители повторного действия являются более дешевым устройством, в последнее время, судя по ответам большинства потребителей, наблюдается тенденция к преимущественному применению линейных выключателей, обеспечивающих более высокую надежность электроснабжения. После успешного АПВ линейные выключатели автоматически подготовляются к выполнению нового полного цикла операций, в то время как предохранители повторного действия для производства полного цикла требуют замены перегоревшего патрона.

Линейные выключатели можно настраивать на несколько последовательных мгновенных отключений и отключений с выдержкой времени, что повышает возможность полного восстановления электроснабжения после успешных АПВ и уменьшает время перерыва в электроснабжении при неуспешных АПВ.

С целью улучшения согласования предохранителей и линейных выключателей на линиях с масляными выключателями на подстанциях в последнее время наблюдается стремление к повышению быстродействия этих масляных выключателей. Вместо широко применявшихся ранее выключателей с собственным временем отключения 0,133 *сек* (8 периодов при частоте 60 *гц*) получают распространение выключатели, отключающие за 0,083 *сек* (5 периодов при той же частоте). В частности, такой выключатель на напряжения до 14,4 *кв* выпущен фирмой Дженерал Электрик. По данным фирмы, этот выключатель обладает меньшим весом по сравнению с 8-периодным. Пружинный механизм привода позволяет осуществить мгновенное повторное включение даже при отсутствии источника оперативного тока.

Литература

1. Electrical World, стр. 98, 149, т. 138, № 8, 1952.
2. Electrical World, стр. 126 и 20, т. 138,№ 10, 1952.
3. Tr. AIEE, т. 72, ч. III, стр. 901, 1953.
4. El. Eng, т. 74, стр. 593, № 7, 1955.

Кандидат техн. наук М. С. Левин,
кандидат техн. наук Н. М. Зуль

НОВЫЙ РОТОРНЫЙ СНЕГООЧИСТИТЕЛЬ ДЛЯ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ С ТЕПЛОВОЗОМ

Из всех видов снегоочистителей, применяемых на железнодорожном транспорте, наиболее эффективным является роторный. Принцип его работы основывается на срезании и захватывании снега вращающимся ротором, после чего снег отбрасывается за пределы пути под воздействием центробежной силы. До настоящего времени роторные снегоочистители строились с паровым приводом для работы в комплексе с паровозами.

В связи с широким распространением тепловозной тяги на железных дорогах США возникла потребность в замене паровых роторных снегоочистителей новыми, которые могли бы работать совместно с тепловозами.

За последнее десятилетие были испытаны многочисленные модели таких снегоочистителей. Лучшие результаты показал роторный снегоочиститель с электроприводом, получающий питание от одной из секций толкающего тепловоза. Он характеризуется надежностью в работе, предельной простотой, наличием стандартных взаимозаменяемых с тепловозами частей, способностью к саморегулированию, хорошей приспосабливаемостью к условиям работы, низкой первоначальной стоимостью и незначительными расходами по содержанию.

Изучение основных принципов работы роторных снегоочистителей показывает, что мощность, необходимая для вращения ротора, зависит от скорости подачи, при которой осуществляется снегоочистка. Мощность расходуется частично на резанье и частично на отбрасывание снега в сторону.

Снегоочистительный состав состоит из роторного снегоочистителя, за которым следуют две секции тепловоза. Одна из них, ближайшая к снегоочистителю, обеспечивает привод ротора энергией; другая перемещает снегоочистительный состав. Секции тепловозов и снегоочиститель связываются между собой проводами управления и силовым кабелем. При этом общее управление осуществляется по системе многих единиц посредством контроллера, расположенного на снегоочистителе.

Управление всеми операциями из кабины снегоочистителя гарантирует хорошую видимость пути и возможность своевременного изменения скорости движения поезда при меняющейся глубине снежного заноса.

В качестве двигателей привода на снегоочистителе использованы стандартные тепловозные тяговые электродвигатели типа GE-731 с последовательным возбуждением и типовыми зубчатыми передачами (рис. 1).

Наибольший интерес представляет электрическая схема снегоочистителя, обеспечивающая его работу в комплексе с тепловозами различных серий, имеющими разные внешние характеристики главных генераторов. Схема обеспечивает также автоматическую защиту привода как от перегрузок, так и от чрезмерного увеличения скорости вращения ротора. При этом полная мощность дизеля секции тепловоза, обеспечивающей привод энергией, используется в широком диапазоне скоростей вращения ротора.

Для привода применена схема с независимым возбуждением двигателей и стабилизирующими сопротивлениями. Возбудитель представляет собой вспомогательный генератор постоянного тока мощностью 25 *квт*, с напряжением на коллекторе 37,5 *в* типа GE-1185-M. Он предназначается для питания обмоток возбуждения двигателей привода, которые в этом случае приобретают характеристики компаундных машин. Возбудитель приводится во вращение двигателями привода ротора. Поэтому скорость его вращения связана со скоростью вращения ротора, и он реагирует на ее изменения.

Магнитное поле в возбудителе (B) создается в результате действия независимой (н. в.) и дифференциальной (д. в.) обмоток возбуждения (рис. 2). Магнитное поле, создаваемое независимой обмоткой возбуждения, неизменно, и оно определяет скорость вращения ненагруженного ротора. Питание этой обмотки осуществляется от низковольтной цепи (74 *в*) вспомогательного генератора энергоснабжающей секции тепловоза ($вГ$). Последовательно с этой обмоткой включено регулируемое сопротивление (r_4), позволяющее приспосабливать привод к работе с тепловозами различных серий.

Магнитное поле, создаваемое дифференциальной об-

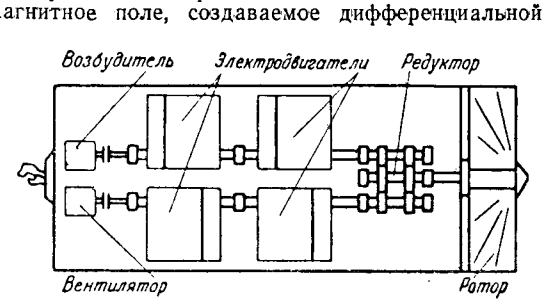


Рис. 1

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

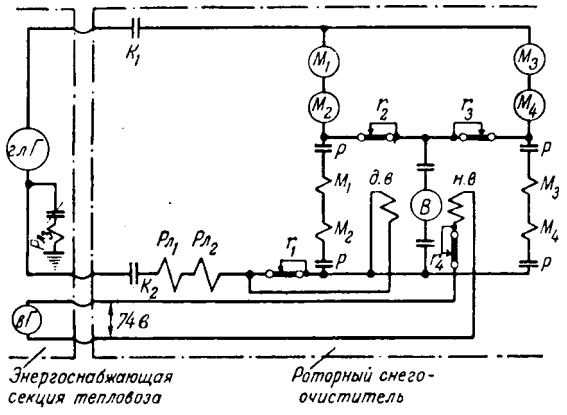


Рис. 2

моткой возбуждения, пропорционально току нагрузки двигателей привода и определяет скорость вращения ротора под нагрузкой. Регулируемое сопротивление (r_1), включенное в электрическую цепь и допускающее предварительную регулировку, служит для тех же целей, что и сопротивление r_4.

Мощность, отдаваемая возбудителем, пропорциональна скорости его вращения и току возбуждения.

Реверсор (P), изменяя направление тока в обмотках возбуждения двигателей привода (M_1, M_2, M_3, M_4), позволяет менять направление вращения ротора.

Когда снегоочиститель при движении вперед врезается в снег, скорость вращения ротора снижается, а нагрузочный момент растет. При этом полная мощность дизеля секции тепловоза используется в широком диапазоне скоростей вращения ротора.

Скорость вращения ротора уменьшается с увеличением скорости движения снегоочистителя. Когда она приближается к $^1/_2$ ее номинального значения и возникает опасность принудительной остановки ротора из-за забивания его снегом, срабатывает специальная защита. С уменьшением скорости вращения ротора ток нагрузки двигателей привода увеличивается. Этот ток протекает через силовую катушку реле $Рл_1$, которое воздействует на возбуждение главного генератора толкающей секции тепловоза, уменьшая его напряжение с увеличением тока нагрузки. При этом скорость движения снегоочистителя уменьшается.

Превышение вращающим моментом ротора максимально допустимого значения приводит также к срабатыванию реле $Рл_2$. При этом оно уменьшает возбуждение главного генератора энергоснабжающей секции тепловоза, переводит дизель на холостой ход, что приводит к прекращению движения ротора. Мгновенная задержка такого рода сопровождается размыканием контакторов силовой цепи и полным снятием напряжения с тяговых электродвигателей толкающей секции, т. е. остановкой снегоочистительного состава.

С целью предотвращения деталей от повреждений при чрезмерных скоростях на снегоочистителе предусмотрена защита посредством механического предохранителя. В случае превышения ротором допустимой скорости вращения предохранитель снижает возбуждение главного генератора энергоснабжающей секции тепловоза, переводит дизель на холостой ход, после чего размыкаются контакторы силовой цепи электропривода ротора и последний полностью обесточивается.

На случай внезапного резкого повышения вращающего момента на валу ротора, которое может иметь место при ударе о скрытое в снегу препятствие, имеются специальные шпильки в муфтах, срезаемые в этом случае и предохраняющие привод от повреждений.

Описанный электропривод роторного снегоочистителя обеспечивает ротору полную мощность дизеля в широком диапазоне его скоростей.

(Railway Locomotives and Cars, т. 129, стр. 63, № 4, 1955)

Кандидат техн. наук, доц. Ю. Л. Картвелишвили

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ[1]

Одним из самых эффективных способов увеличения производительности труда в сельском хозяйстве является максимальное использование электроэнергии. Электрификация сельского хозяйства за рубежом после второй мировой войны производится в большом масштабе. Особенно быстро растет потребление электроэнергии в сельском хозяйстве США: в 1950 г. было потреблено 12,3, а в 1954 г.— 20 млрд. *квтч*; в 1965 г. ожидается потребление 50 и в 1970 г.— 70 млрд. *квтч*, т. е. в среднем 10 тыс. и 14 тыс. *квтч* в год на 1 ферму соответственно.

Не менее интенсивно электрификация сельского хозяйства идет и в Канаде. Только в одной провинции Альберта за 1955 г. электрифицировано 5 000 ферм, а в провинции Саскачеван, где из-за малой плотности населения электрическая сеть до второй мировой войны не была развита, за последние годы проложили специально для нужд сельского хозяйства высоковольтную сеть на 144 и 72 *кв* по системе «один провод — земля». Для ускорения строительства проект сети был выполнен на основании данных воздушной разведки. Построены новые и расширены существующие электрические станции на общую мощность 68 500 *квт*. В результате этих мероприятий только за 1955 г. к распределительной сети было присоединено 7 500 ферм, и к концу этого года общее число электрифицированных ферм в этой провинции достигло 32 тыс.

Электрификация сельского хозяйства в зарубежных странах Европы больше всего развивается в Англии, затем в ФРГ. Среднее потребление электроэнергии в ФРГ составляет в настоящее время 65 *квтч/га* в год, но во многих местах с хорошим электроснабжением оно доходит до 650 *квтч/га* в год.

В 1954 г. в ФРГ было организовано 234 показательных хозяйства. Наблюдения за ними показали, что с увеличением размеров хозяйства установленная мощность и потребляемая энергия в пересчете на гектар земли уменьшаются. Так, для хозяйств на 6...10 *га* установленная мощность в среднем равняется 2,4 *квт/га*, для 11...20 *га* — 2,1, для 21...30 *га* — 1,45 и для хозяйств свыше 30 *га* — только 1,0 *квт/га*. Среднее потребление электроэнергии за год в этих хозяйствах составляет соответственно 448, 380, 335 и 245 *квтч/га*.

Значительные работы по электрификации сельского хозяйства проведены в странах народной демократии — в Польше, Венгрии, Чехословакии и др.

Рассматривая вопрос об электрификации отдельных отраслей сельского хозяйства, нужно заметить, что в полеводстве применение электроэнергии за рубежом относительно невелико: электротракторы и другие самоходные сельскохозяйственные машины с электроприводом не получили широкого распространения даже в странах, бедных нефтью. Но в связи с широким применением комбайнов для уборки урожая, когда требуется досушка зерна, предлагается для этой цели использовать электросушилки, хотя вопрос и является спорным. Электротехническая научно-исследовательская ассоциация в Англии указывает, что применение электроэнергии в Англии для целей сушки урожая может оправдываться лишь для небольшого количества очень ценных сельскохозяйственных продуктов или при комплексной электрификации всех основных сельскохозяйственных работ. Простая замена жидкого или твердого топлива электроэнергией экономически не оправдывается. Тем не менее в Англии применяют электросушку зерна, и наиболее распространенным является способ сушки, совмещаемый со складированием зерна. Через зерно, насыпанное в бункеры с пористым основанием, продувают воздух, нагретый электронагревательными элементами. Расход воздуха — 0,25 $м^3$ на 1 $м^2$ основания бункера, перепад температуры 5° С. Расход энергии доходит до 30...35 *квтч* на удаление 1% влаги из 1 *т* зерна в зависимости от способа сушки.

Электросушка травы с успехом применяется в Швейцарии. Первая электросушильная установка барабанного типа была построена в 1940 г.; позднее появились одно- и многоленточные сушилки, в которых передвижение травы осуществляется при помощи нескольких ленточных

[1] По материалам иностранной периодики за последние 2 года.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

транспортеров, помещенных в огнеупорной камере. Камеры разделены на несколько зон, расположенных одна над другой и имеющих каждая свой электронагревательный элемент и электровентилятор. Нагретый воздух обдувает траву по спирали. В некоторых типах сушилок теплый воздух возвращается обратно и используется вторично. Уже в 1952 г. в Швейцарии действовало 48 сушильных установок общей мощностью 40 тыс. *квт*. В настоящее время разрабатывается новая модель сушилки центробежного типа, в которой трава в процессе сушки нарезается и измельчается в муку. При электрической сушке в траве сохраняется больше усваиваемых белков и крахмала и остается меньше воды по сравнению с сушкой на солнце.

В ГДР и ФРГ тоже применяются установки для электросушки травы, но в меньшем масштабе. Расход электроэнергии определился там в 10...20 *квтч/ц* при сушке травы с первоначальной влажностью 40%. В ФРГ применяют также электросушку картофеля и свеклы.

Применение электроэнергии в животноводстве вообще, а особенно в молочном хозяйстве, значительно шире и разнообразнее, чем в полеводстве. Электродвигатели применяют для водоснабжения, дворового транспорта, приготовления кормов, чистки и вентиляции стойл и т. д. Кроме того, электроэнергию используют для обработки молока, питания электрозабора, отопления, освещения стойл и для многих других целей.

Мощность электропривода для насосов (поршневых и центробежных) составляет 0,4...11,5 *квт* в зависимости от потребного количества воды. Норма ежедневного расхода воды: 70 *л* на одну молочную корову; 45 *л* на быка, рабочую корову или лошадь; 14 *л* на свинью и 7 *л* на овцу. На скотном дворе около 50% по трудоемкости составляют такие работы, как транспортировка кормов, подстилка навоза и т. п. Для этой цели широко применяют ковшевой или ленточный передвижные транспортеры и пневматический транспорт. Мощность электроприводов для транспортеров 1,0...2,25 *квт*, а для пневматического транспорта — 3,75...4,5 *квт*. Для приготовления кормов применяют ряд специальных машин с электроприводами, в том числе соломорезки мощностью 1,5...3,75 *квт*, корнерезки 1,5... 3,75 *квт*, дробилки 2,5 *квт*, машины для лущения кукурузы 1,5 *квт*, сеноукладчики 1,5...3,0 *квт*, весовые разгрузчики 0,2...1,0 *квт*, силосопогрузчики 2,25...3,75 *квт* и др. Для чистки и уборки стойл применяют машины с электроприводами: механический погрузчик навоза мощностью 1,5...3,75 *квт*, мешалка навозной жижи 2,25 *квт*, насосы для откачки навозной жижи — центробежный 1,5 *квт* или поршневой 3,75 *квт*, воздушный компрессор 2,25 *квт*, пылесос стойловый 0,75...3,75 *квт*, пылесос для чистки животных 0,25 *квт*. Расход электроэнергии на чистку стойл составляет 0,22...0,24 *квтч* на одну корову в месяц. Кроме того, на электроинструменты для ремонта машин расходуется дополнительно около 60 *квтч* в год.

Мощность электровентиляторов для искусственной вентиляции стойл обычно равна 200 *вт*. Для экономии электроэнергии в стойле автоматически поддерживается постоянная температура при помощи термостата. Последний устанавливается на высоте 1,7...2,0 *м* от пола и должен иметь высокую чувствительность (±1°). Включенче вентилятора требуется на 5...10 *мин/час*. На каждую голову рогатого скота требуется 50 $м^3$ свежего воздуха в час. Расход энергии на вентиляцию стойл составляет около 40 *квтч* на одну корову в год. Путем наблюдений установлено, что автоматическая вентиляция стойл экономически оправдывается даже в том случае, если не учитывать значительного улучшения условий содержания скота.

Вопросом электрического отопления стойл, свинарников и других помещений для скота много занималась шведская организация по контролю электрических материалов, которая утвердила две системы электрического отопления: подвешенными к потолку светильниками с угольными лампами 150...250 *вт* и нагревательными элементами 80 *вт*, состоящими из пластинок сопротивления, заложенных в бетонные брусья 40×40×100 *см*. Пластинки присоединяются к осветительной сети через трансформатор, понижающий напряжение до 24 *в*. Годовой расход энергии на отопление молочных ферм в северной части США составляет 700...900 *квтч* на стойло, где содержатся 22...25 коров.

Электрическое освещение улучшает условия работы и повышает производительность труда обслуживающих работников. Кроме того, искусственное освещение увеличивает активный обмен веществ у животных и тем самым повышает их продуктивность, особенно у дойных коров. В США в ближайшее время ожидается получение удоя от одной коровы в среднем по стране до 2 480 *кг*, в 1960 г. 2 730 *кг*, а в 1975 г. 3 400 *кг* молока в год.

Электродоильные машины применяются весьма широко; их мощность колеблется от 0,375 до 0,75 *квт*, расход энергии в месяц на одну корову по данным США 0,9... 2,5 *квтч*, а по данным ФРГ — 1,4...1,96 *квтч*.

После дойки коров молоко почти везде искусственно охлаждается. Для этой цели применяют электропривод мощностью около 1,5 *квт*; расход энергии составляет 0,6... 1,0 *квтч* в месяц на один бидон молока емкостью 36 *л*. Для нагрева воды, используемой в молочной, расходуется 6 *квтч* электроэнергии на одну корову в месяц.

Для пастеризации молока в США стали применять электрический нагрев взамен парового. Это позволило осуществить непрерывный процесс пастеризации, повысить температуру с 76,5 до 88° и обеспечить точный температурный режим процесса. Повышение температуры пастеризации имеет большое значение с точки зрения уничтожения вредных бактерий. Паровая пастеризация не может протекать при температуре выше 76,5° из-за карамелизации сахара в молоке и появления привкуса. Точная регулировка температуры позволяет легко проводить пастеризацию сливок, чего нельзя было достигнуть при паровом нагреве. Пропускная способность установки для пастеризации мощностью 90 *квт*, 220 *в* составляет 450 *кг* молока в час.

Стерилизацию молочной посуды и утвари, а также приготовление горячей воды целесообразно производить при помощи электроэнергии. Стерилизационные установки могут быть двух типов: 1) прямоточные, приготовляющие пар во время его потребления, на что требуется минимальная мощность (6 *квт* при вместимости камеры 1,0 $м^3$ и до 12 *квт* для камер большей вместимости), и 2) постепенно аккумулирующие тепло, мощностью всего 1,0 *квт* при камере 1,0 $м^3$, и включаемые за 6...8 час до потребности в паре; при объеме камеры 2,0 $м^3$ и более при некотором сокращении времени приготовления пара мощность установок доходит до 4 *квт*. Обычно нагреватели снабжаются реле времени и работают автоматически. Для стерилизации предметов, не помещающихся в камере, устанавливаются особые парогенераторы для быстрого приготовления пара, мощность которых доходит до 36 *квт* и более.

Для получения горячей воды используются баки с хорошей теплоизоляцией и погруженными в воду электронагревателями. Потребная мощность для бака емкостью 75...100 *л* при температуре воды 77...83° С равна 1,0... 1,5 *квт*. Термостат для автоматического включения и выключения устанавливается на 83 и 88° С.

В США были обследованы пять молочных ферм со счетчиками энергии. Две из них имели 22...24 молочных коровы. Годовой расход электроэнергии на этих фермах без учета энергии на дворовый транспорт и на пастеризацию молока составил 3 364...5 243 *квтч*, т. е. на одну корову 154...230 *квтч* в год.

Электроэнергия широко применяется также и в птицеводстве. В США 90% всех цыплят выводится в инкубаторах, которые применяются двух типов — настольного и кабинетного. Первый рассчитан на небольшое число яиц — 70...400 шт., а второй — 800...36 000 шт. Расход электроэнергии на нагревание инкубатора значительно изменяется в зависимости от его величины; так, например, при температуре окружающей среды 10° С в инкубаторе на 70 яиц на каждого цыпленка расходуется электроэнергии 1,0 *квтч*, в инкубаторе на 400 яиц — 0,33 *квтч*, а в инкубаторах кабинетного типа на 7...20 цыплят расход электроэнергии не превышает 1 *квтч*. Кабинетные инкубаторы снабжены вентилятором, приспособлением для поворачивания яиц и автоматическим контролем температуры и влажности воздуха.

После выводки цыплят помещают в брудеры до шестинедельного возраста. Электрообогрев как инкубаторов, так и брудеров производится лампами накаливания или проволочными сопротивлениями. Во втором случае нагревательные элементы заделываются в изоляционную массу (бетон) в виде панелей. Панель мощностью 400 *вт* нагре-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

вает площадь 195 *см*² при равномерном распределении тепла.

В крупных и открытых брудерах стали широко применять обогрев цыплят инфракрасными лучами, обладающими способностью проникать в тело цыплят при сравнительно низкой температуре и обеспечивать правильный обогрев цыплят без поверхностного ожога кожи. Для получения инфракрасных лучей выпущены два типа излучателей — светящиеся и несветящиеся. Светящиеся излучатели типа лампы накаливания мощностью 250 *вт* применяются с зеркальным рефлектором. Одна лампа достаточна для облучения 75 цыплят. Несветящиеся излучатели изготовляются мощностью от 180 *вт* на 75 цыплят до 400..600 *вт* на 300 цыплят. Удельный расход энергии при пользовании лампами 250 *вт* равен 2...3 *квтч* на одного цыпленка. В брудерах с колпаками и многоярусного типа при реостатном обогреве расход энергии меньше, чем при ламповом, а именно 1,0...1,5 *квтч* на одного цыпленка и 0,75 *квтч* в брудере батарейного типа при массовом выращивании цыплят.

Электроэнергия в птицеводстве, помимо выращивания цыплят, применяется и для создания искусственного освещения, эффективно влияющего на яйценоскость кур. Удлинение освещенности до 12 *час* ежедневно с октября до марта дает увеличение яйценоскости на 25...30% при увеличении веса яиц на 2,5%, веса кур — на 14% и потребления корма — на 15%. Общепринятая мощность ламп накаливания для целей освещения кур составляет 60 *вт*. Расход электроэнергии — 50 *квтч* за 6 мес. на 100 голов птицы. Еще лучшие результаты получаются при кратковременном (ударном) периодическом освещении большой яркостью. Для этого необходимо включать 2 раза в день лампы общей мощностью 1,0...2,0 *квт* на каждые 100 кур. В этом случае расход энергии снижается с 50 до 4,5 *квтч*.

Электрические лампы с успехом применяются также для контроля качества яиц и степени их насиженности. При помощи электрического света определяют пол цыплят. Для этого применяют специально сконструированную трубку, через которую направляется луч света, освещающий внутренние рудиментарные органы размножения цыплят, изображение которых ясно видно на окуляре. Прибор — компактный, переносный, может питаться как от осветительной сети, так и от батареи. Опытный наблюдатель может установить пол 800 цыплят в час.

Для мойки и сушки яиц применяют машину производительностью до 4 000 яиц в час; при этом расход энергии составляет 1,5 *квтч* за час. После мойки и сушки яйца автоматически сортируются и тут же упаковываются. Производительность упаковочных машин доходит до 6 000 яиц в час; мощность двигателя — 0,5 *квт*, расход энергии — 0,5 *квтч* на одну партию яиц. Для мойки, сушки, сортировки и упаковки имеется комбайн, производящий все эти операции в нужной последовательности.

Машинка для сухой чистки убитых птиц, очищая за час свыше 50 птиц, потребляет при этом меньше 1 *квтч* энергии. Когда не требуется сохранения пера, чистку производят после погружения птиц в кипяток или расплавленный воск на 25...30 *сек*. Специальная машинка, снабженная резиновыми пальцами и электроприводом, ощипывает до 180 птиц в час.

На птицефермах применяют электропривод также для подачи птицам корма и воды из расчета 0,3...0,6 *л* на каждую птицу, для вентиляции помещения, механизированной уборки мусора и помета и т. д. В зимнее время питьевая вода нагревается электронагревателями до 10° С, а помещение отапливается до 12...15° С. Эти температуры поддерживаются термостатом.

Широкое применение электроэнергии в птицеводстве в несколько раз увеличивает производительность труда. Например, в США на одной из ферм трое рабочих обслуживают 12 000 кур-несушек и 12 000 кур для откорма. На обязанности рабочих, помимо ухода за курами, лежит сбор яиц, обработка и доставка кур в город для продажи, а также обслуживание шести ездовых лошадей. Годовое потребление электроэнергии на этой ферме составляет 175 000 *квтч*. Без применения электроэнергии на этой ферме потребовалось бы 6...10 рабочих.

Электроэнергия в свиноводстве применяется главным образом как источник тепла. Надлежащий температурный режим (15° С) в свинарнике снижает срок откорма свиней до поставки их на рынок до 100 дней вместо обычных 180.

Поддерживание надлежащего температурного режима в свинарнике имеет еще большее значение для молодняка. Потери поросят в первые недели их существования, особенно при зимнем опоросе, достигают 25% и больше. Основная причина заключается в том, что поросята, стремясь погреться, попадают под матку. Поддерживание температуры воздуха около 36° С устраняет это явление. Для этой цели применяют электронагревательные элементы подобно описанным выше для брудеров, т. е. лампы накаливания, реостаты и инфракрасные излучатели. Последние подвешиваются в отгороженном для поросят помещении; облучение прекращается, когда поросята достигают восьминедельного возраста.

Применение передвижного электронагревательного устройства требует весьма надежной изоляции токоведущих частей и прочного монтажа всего оборудования. Более надежным и простым способом отопления является укладка в бетонный пол электронагревательных элементов из проволоки высокого сопротивления и питание их от осветительной сети или же укладка обычной проволоки и ее питание низким напряжением (10 *в*) через трансформатор. Трансформатор мощностью 150 *вт* достаточен для нагрева 2 *м*² площади пола, т. е. для одной матки с 10 поросятами. Расход электроэнергии на каждого поросенка за восемь недель его выращивания составляет 3 *квтч*.

В свиноводстве не редки случаи, когда приходится прибегать к искусственному кормлению новорожденных поросят. Для этого изготовляют «приемные матки», представляющие собой керамическую посуду, к нижней части которой приделан ряд резиновых сосков. В посуду введен электронагревательный элемент, поддерживающий постоянную температуру молока 36° С.

Другой вариант искусственного питания предусматривает установку ряда бутылок, снабженных резиновыми сосками и обогреваемых инфракрасными лучами. Расход электроэнергии составляет около 7 *квтч* в неделю на 9 поросят.

Немалое значение приобретает электроэнергия и в садоводстве и огородничестве. На выставке «Электричество в сельском хозяйстве и садоводстве» в Ульме (ФРГ) в мае 1954 г. было представлено полностью электрифицированное садоводство. В числе экспонатов показывалась установка для автоматического орошения питательным раствором при помощи специального электронасоса, включаемого часовым датчиком, имеющим недельный завод и позволяющим регулировать периодичность и продолжительность поливов в зависимости от культуры и времени года. Контроль концентрации раствора производится при помощи простейшего двухэлектронного датчика. Для подогрева используется электрический ток, подаваемый к нагревательному элементу через регулятор температуры. Помимо многочисленных приборов для отопления, регулирования, освещения и т. д., было представлено устройство для искусственного облучения садовых растений при помощи ламп со светящимся заполнением, с ртутными парами и обычных ламп накаливания.

При выращивании сельскохозяйственных культур в малых масштабах или весьма ценных в Англии и Скандинавских странах распространен электрический нагрев почвы. Нагрев производится при помощи голых или изолированных проводов, закладываемых на расстоянии 150...200 *мм* друг от друга на глубине 125...150 *мм*. Потребная мощность определяется из расчета 108 *вт*/*м*². Обычно применяют ток нормальной частоты, напряжение которого понижают до 30 *в* при помощи трансформаторов мощностью 1...10 *ква*. Иногда используют и напряжение силовой или осветительной сети непосредственно, но при этом целесообразно выключать сеть нагревания почвы на время работы на данном участке. Электроэнергию применяют не только для обогрева, но и для стерилизации почвы путем ее подогрева до 85°.

Для охраны садов от птиц применяют электрические трещотки. В одном из садов в Англии 90% урожая вишен портили птицы. Для их отпугивания в дневное время включались электротрещотки на 5...10 *сек* с перерывами в 1...5 *мин*. Трещотка питалась от генератора, вращаемого ветродвигателем.

Ввиду дешевизны и легкости переноса электрический забор получает большое распространение в

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

сельском хозяйстве. Такой забор состоит из оцинкованной проволоки диаметром 1,8...2 *мм*, натянутой между кольями диаметром 6...8 *мм*, которые забиты в землю на расстоянии 10...20 *м* один от другого. Проволока смонтирована на изоляторах на высоте 70...80 *см* для коров и быков, 1 *м* для лошадей, 50 *см* для овец и коз; для свиней применяют два провода на высоте 25 и 50 *см*. К проводу подводят импульсы электрического напряжения, безопасные для людей и животных; при прикосновении животных к проволоке происходит замыкание тока на землю, ощущаемое в виде удара. Импульсы вырабатываются при помощи маятниковой, микродвигательной, релейной или электронной схем. В ФРГ выпущены специальные инструкции, в которых установлены следующие предельные значения: напряжение импульса не более 5 000 *в*, ток импульса не более 300 *ма*, длительность импульса 0,15 *сек*, значение постоянного тока между импульсами 0,5 *ма*. В Англии рекомендуется: ток импульса не более 0,5...1,0 *а*, максимальная длительность импульса 0,1 *сек*, минимальный интервал между импульсами 0,75 *сек*; количество электричества 3 *мк*.

Кандидат техн. наук В. А. Изъюров

✧ ✧ ✧

Хроника

КОНГРЕСС В БЕЛГРАДЕ В СВЯЗИ С ЮБИЛЕЕМ ТЕСЛЫ

В июле 1956 г. в Югославии состоялся конгресс ученых, электротехников и электроэнергетиков, посвященный 100-летию со дня рождения выдающегося югославского электротехника изобретателя Николы Теслы[1].

На конгресс прибыли представители научных организаций из различных стран. От имени правительства Федеративной Народной Республики Югославии конгресс открыл заместитель президента ФНРЮ **Светозар Вукманович.**

Вступительный доклад сделал генеральный секретарь национального комитета по чествованию Теслы профессор **Дамианович**. Затем были заслушаны научные доклады, подготовленные зарубежными учеными специально к юбилею Теслы: **Ю. Г. Толстова** и **А. Е. Алексеева** (СССР) — о передаче электрической энергии на далекие расстояния, о современных достижениях в конструировании мощных альтернаторов; **А. Флеминга** и **Р. О. Каппа** (Англия) — о вкладе Теслы в развитие инженерного искусства в электротехнике, о лекции Теслы в Королевском институте Великобритании; **Я. Эйслера** (Венгрия) — о развитии многофазных трансформаторов; **Т. Бедефельда, Х. Мюллера** и **Р. Вивега** (ФРГ) — об истории и перспективах производства синхронных машин, о применении токов высокой частоты для нагрева, о значении научно-технических исследований; **Н. Бора** (Дания) — об основах и перспективах развития физических наук; **К. Чемберса** (США) — о системе Теслы и передаче электроэнергии Ниагарской гэс; **Ф. Кахена, Ж. Даррье, Г. Гуттона** и **Ш. Дитчша** (Франция) — об актуальных проблемах передачи электроэнергии, о современной электродинамике и конструировании машин, о достижениях радарной техники, о работах в области определения электрических и магнитных величин и единиц; **Ф. Танка** и **А. Гербера** (Швейцария) — о технике высоких частот и работах Теслы, о современных системах радиоэлектрического телеуправления и первом изобретении в этой области Теслы.

При открытии конгресса с приветственным словом от советской делегации выступил один из первых после Октябрьской Революции ответственных редакторов журнала «Электричество» **П. И. Воеводин**, поделившийся с участниками конгресса своими личными воспоминаниями о Николе Тесле, относящимися к пребыванию П. И. Воеводина в Нью-Йорке в 30-х годах.

После двухнедельной поездки по стране, во время которой делегаты конгресса выступали с сообщениями, посвященными памяти славного сына Югославии Николы Теслы, делегаты были приняты Президентом ФНРЮ Иосипом Броз Тито.

[1] Статью о Н. Тесле см. Электричество, № 7, стр. 66. 1956.

А. А. МОРОЗОВ

18 сентября 1956 г. скончался заведующий кафедрой «Использование водной энергии» Ленинградского политехнического института имени Калинина, заслуженный деятель науки и техники, доктор техн. наук, проф. Александр Александрович Морозов. Высшая школа, энергетическая наука и техника понесли тяжелую утрату.

В 1912 г. А. А. Морозов окончил электромеханическое отделение Петербургского политехнического института и всю свою дальнейшую жизнь посвятил гидроэнергетике, работая в проектных и научных организациях и ведя в то же время педагогическую работу в ленинградских втузах.

Трудно переоценить роль Александра Александровича в создании кадров советских гидроэнергетиков, строителей и эксплуатационников.

Программа и метод преподавания курса использования водной энергии, созданные А. А. Морозовым приняты в большинстве высших учебных заведений Советского Союза и стран народной демократии. Его классический труд «Использование водной энергии» переведен на китайский, чешский, румынский и болгарский языки, а также переиздан на русском языке в Китае.

Высокими достоинствами и практической полезностью отличаются и остальные труды, написанные А. А. Морозовым. Исключительно велико значение вклада А. А. Морозова в решение практических задач развития советской гидроэнергетики.

Он непрерывно участвовал в работе организаций, проектировавших гидроэлектрические станции, был одним из организаторов проектного института «Гидроэнерго-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

проект» и одно время возглавлял работу института в качестве главного инженера.

А. А. Морозов принимал участие в разработке большой части схем использования рек СССР, в разработке проектов крупнейших построенных и ныне строящихся гидростанций нашей страны.

Большое значение имела деятельность А. А. Морозова по созданию научных основ развития советской энергетики. Александр Александрович Морозов был одним из участников составления плана ГОЭЛРО, участвовал в годы второй пятилетки в разработке первоначальных наметок Единой высоковольтной сети Европейской части СССР. В последние годы, являясь одним из ведущих сотрудников Энергетического института имени Кржижановского Академии наук СССР, А. А. Морозов занимался вопросами развития энергетических систем СССР и их объединений.

А. А. Морозов был крупным общественным деятелем. Он принимал активное участие в работе Общества по распространению политических и научных знаний, в работе научных инженерно-технических обществ, в том числе Общества энергетиков (НТОЭП), участвовал во Всемирной конференции сторонников мира.

Александр Александрович Морозов был талантливым педагогом, ученым и общественным деятелем, глубоким патриотом, чутким, гуманным и обаятельным человеком, пользовавшимся всеобщим высоким уважением.

За плодотворную научно-педагогическую и инженерную деятельность А. А. Морозов был награжден орденом Ленина, орденом Трудового Красного Знамени, двумя медалями, а также значками Отличника и почетными грамотами союзных республик и союзных министерств.

Светлая память об Александре Александровиче Морозове будет жить в сердцах его учеников и товарищей по работе.

Г. М. Кржижановский, М. А. Шателен, А. В. Винтер, М.П. Костенко, В. И. Попков, Л. Р. Нейман, В. В. Болотов, М. Д. Каменский, А. М. Залесский, С. В. Усов и др.

✧ ✧ ✧

Библиография

НОВЫЕ КНИГИ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСТВУ, ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Афанасьев В. В. ВОЗДУШНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ. 196 стр., ц. 5 руб. 40 коп. Госэнергоиздат.

Барзилович В. М. ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА. 168 стр., ц. 6 руб. 05 коп. Госэнергоиздат.

Бойдек С. А. ИМПУЛЬСНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ АКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ. 21 стр., ц. 5 руб. Академиздат.

Бояр-Созонович С. П. ГЕНЕРАТОР ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕБОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ БЕЗ ТРУЩИХСЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ. 15 стр., ц. 1 руб. 50 коп. Академиздат.

Волохова В. А. и Пичков В. П. ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ПОВЕРКИ ОБРАЗЦОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ. 21 стр., ц. 7 руб. Академиздат.

Воробьев А. А. и Завадовская Е. К. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ. 312 стр., ц. 10 руб. 20 коп. Гостехиздат.

Геращенко Г. В. СПРАВОЧНОЕ РУКОВОДСТВО ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ КАТУШЕК ЭЛЕКТРОАППАРАТОВ. 87 стр., ц. 4 руб. Госэнергоиздат.

ГОСТ 1954-55. НОРМАЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ (МЕРЫ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ). 10 стр., ц. 35 коп. Стандартгиз.

ГОСТ 4541-48. МАШИНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ. ОБОЗНАЧЕНИЯ ГАБАРИТНЫХ И УСТАНОВОЧНЫХ РАЗМЕРОВ. Взамен ОСТ 4736. Переиздание. 10 стр., ц. 35 коп. Стандартгиз.

ГОСТ 7206-54. ПЕЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДУГОВЫЕ. Ряд номинальных емкостей. 1 стр., ц. 10 коп. Стандартгиз.

ГОСТ 7207-54. ТРАНСФОРМАТОРЫ ТРЕХФАЗНЫЕ ДЛЯ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ. Ряд номинальных мощностей и напряжений. 2 стр., ц. 10 коп. Стандартгиз.

Дуков В. М. П. Н. ЛЕБЕДЕВ. Изд. 2-е. 120 стр., ц. 1 руб. 40 коп. Учпедгиз.

ИНСТРУКЦИЯ 215-54 ДЛЯ ПРОВЕРКИ ЧАСТОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ВЫСОКОСТАБИЛЬНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ. 36 стр., ц. 1 руб. 15 коп. Стандартгиз.

ИНСТРУКЦИЯ ПО РЕМОНТУ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 35—220 *кв*, НАХОДЯЩИХСЯ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ. Ч. 3. УСТАНОВКА И СНЯТИЕ ТРУБЧАТЫХ РАЗРЯДНИКОВ. 23 стр., ц. 1 руб. Госэнергоиздат.

Капланов М. Р. и Левин В. А. АВТОМАТИЧЕСКАЯ ПОДСТРОЙКА ЧАСТОТЫ. Изд. 2-е, доп. 200 стр., ц. 11 руб. 50 коп. Госэнергоиздат.

Кольман Э. КИБЕРНЕТИКА (о машинах, выполняющих некоторые психические функции человека). 40 стр., ц. 60 коп. Изд. «Знание».

Королькова В. И. ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ. 3-е доп. изд. 448 стр., ц. 16 руб.90 коп. Оборонгиз.

Крамаров О. П. и Серый А. М. ТЕРМОРЕГУЛЯТОР С МАГНИТНЫМ УСИЛИТЕЛЕМ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ. 10 стр., ц. 3 руб. Академиздат.

Кузьмин П. И. ВЫБОР И РАСЧЕТ ДРОССЕЛЬНЫХ РЕГУЛИРУЮЩИХ ОРГАНОВ. 112 стр., ц. 3 руб. 20 коп. Госэнергоиздат.

ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ. Сборник статей. 48 стр., ц. 3 руб. Оргрэс. Госэнергоиздат.

Махлин Б. Ю. ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ АВАРИЙ, ВЫЗЫВАЕМЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЕМ ИЗОЛЯТОРОВ (обзор). 16 стр., ц. 1 руб. Оргрэс. Госэнергоиздат.

Николаев Н. А. ПЕРВАЯ АТОМНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ СОВЕТСКОГО СОЮЗА. 31 стр., ц. 60 коп. «Знание».

Одинцов В. Е. СПРАВОЧНИК СЕЛЬСКОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. 2-е доп. изд. 350 стр., ц. 9 руб. 60 коп. Госсельхозиздат УССР.

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ КАШИРСКОЙ ГРЭС. Под общ. ред. **Д. А. Ермакова** и др. 180 стр., ц. 14 руб. Госэнергоиздат.

ОСВЕТИТЕЛЬНАЯ И СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДКА. РАЦИОНАЛИЗАТОРСКИЕ И ИЗОБРЕТАТЕЛЬСКИЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ. 32 стр. ц. 1 руб. 05 коп. Госстройиздат.

Попов В. С., Мансуров Н. Н. и Николаев С. А. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. Учебник для неэлектротехнических техникумов и отделений. Изд. 5-е, испр. 351 стр., ц. 9 руб. 20 коп. Госэнергоиздат.

ПРАВИЛА УСТРОЙСТВА ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ(ВЛ) ПРИ ПЕРЕСЕЧЕНИИ И СБЛИЖЕНИИ С ВОЗДУШНЫМИ ЛИНИЯМИ СВЯЗИ И СИГНАЛИЗАЦИИ. МЭС СССР. 8 стр., ц. 35 коп. Госэнергоиздат.

Привезенцев В. А. ПРОИЗВОДСТВО СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ. Учебное пособие для электротехн. и энергет. вузов и фак. и электромехан. техникумов. Изд. 5-е, переработ. 488 стр., ц. 10 руб. 45 коп. Госэнергоиздат.

Радовский М. И. АЛЕКСАНДР СТЕПАНОВИЧ ПОПОВ. БИОГРАФИЧЕСКИЙ ОЧЕРК. 207 стр., ц. 3 руб. 10 коп. Академиздат.

Рокотян С. С. ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ДАЛЬНИЕ РАССТОЯНИЯ. 79 стр., ц. 5 руб. 80 коп. Госэнергоиздат.

Рудницкий А. А. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ И ИХ СПЛАВОВ. 148 стр., ц.8 руб. 20 коп. Академиздат.

РУКОВОДЯЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫБОРУ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ СОВМЕСТНО РАБОТАЮЩИХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ. 112 стр. ц. 4 руб. 90 коп. Техн. упр. МЭС СССР. Госэнергоиздат.

Сосновский А. А. ВЫПРЯМИТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО ВУ-8. АВТОМАТИЧЕСКИЙ РЕГУЛЯТОР ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ (АРВН). 20 стр., ц. 2 руб. 50 коп. Академиздат.

ТЕЛЕМЕХАНИЗАЦИЯ В НАРОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ. Материалы совещания 29. 11—4. 12. 1954 г. под ред. **М. А. Гаврилова** и др. 481 стр., ц. 27 руб. 50 коп. Академиздат.

ТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО АВТОМАТИЧЕСКИМ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯМ И ПРЕДОХРАНИТЕЛЯМ. 104 стр., ц. 5 руб. 50 коп. Госэнергоиздат.

Толвинский В. А. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА. Изд. 3-е переработ. 468 стр., ц. 20 руб. 25 коп. Госэнергоиздат.

УСПЕХИ ЭЛЕКТРОВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ. СБОРНИК СТАТЕЙ под ред. **Г. А. Тягунова.** 260 стр., ц. 10 руб. 25 коп. Госэнергоиздат.

Харизоменов И. В. РЕОСТАТНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ЖЕСТКИМИ МЕХАНИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ. 22 стр., ц. 8 руб. Академиздат.

Цянь Сюэ-сэнь. ТЕХНИЧЕСКАЯ КИБЕРНЕТИКА. Пер. с англ. **М. З. Литвина-Седого.** Под. ред. **А. А. Фельдбаума.** 462 стр., ц. 17 руб. 05 коп. Изд. иностр. литературы.

Шилоносов М. А. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ. РЕМОНТ И ИСПЫТАНИЯ. Изд. 2-е, испр. и доп. 404 стр., ц. 14 руб. 50 коп. Машгиз.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ СИЛЬНОГО ТОКА. Вып. 5. СООРУЖЕНИЕ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НАПРЯЖЕНИЕМ 3—400 *кв*, МОНТАЖ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ОШИНОВКИ ОТКРЫТЫХ ПОДСТАНЦИЙ. Изд. 2-е. 103 стр., ц. 2 руб. 75 коп. Единые нормы и расценки. Госстройиздат.

ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ. СПРАВОЧНИК. 422 стр., ц. 28 руб. 50 коп. Госэнергоиздат.

ЭНЕРГЕТИКА АВСТРИИ. 48 стр., ц. 4 руб. Госэнергоиздат.

✧ ✧ ✧

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Указатель материалов, помещенных в журнале „Электричество“ в 1956 г.

I. Тематический указатель

Авторы, названия материалов.	№ журнала	Стр.

ПЕРЕДОВЫЕ СТАТЬИ

За дальнейший подъем и технический прогресс советской энергетики	2	1
Задачи электротехнической промышленности	3	1
Электрификация железных дорог — одна из важнейших задач шестой пятилетки	4	1
Развитие электрификации сельского хозяйства	5	1
Об устранении излишеств при проектировании электротехнических установок	6	1
Некоторые вопросы развития атомной энергетики в СССР	7	1
Вопросы автоматизации в энергетике	12	1

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Негневицкий И. Б. и **Липман Д. А.** — К теории идеального дроссельного магнитного усилителя	1	8
Пятин Ю. М. — Расчет токов в линейных цепях	4	67
Егоров П. М. — Применение метода конформных преобразований к моделированию трехмерных потенциальных и вихревых полей	5	31
Тимофеев Б. Б. — Сопротивление стали переменному току	5	50
Куренев С. И. — Представление магнитного поля круговых токов сфероидальными функциями	6	9
Талышинский И. Т. — Расчет цилиндрического индуктора с замкнутой магнитной цепью	6	11
Белоногов Г. Г. — К теории линейного четырехполюсника и многополюсника	6	51
Кляцкин И. Г. — Универсальная система электромагнитных единиц	7	61
Мамонтов О. В. — Расчет переходных процессов в сложных линейных цепях при помощи интеграла Фурье	8	4
Воронов Р. А. — Расчет периодических токов и напряжений при несинусоидальной форме э. д. с.	8	11
Дорофеев Г. И. — Поверхностный эффект в двухслойном проводнике	8	31
Здрок А. Г. и **Смирнов Г. П.** — Работа дросселя насыщения с полупроводниковым выпрямителем и активно-индуктивной нагрузкой	10	44
Губанов М. И. — Метод расчета нелинейных многофазных цепей переменного тока	10	53
Тимофеев Б. Б. — Поверхностный эффект в массивных ферромагнитных проводниках	10	66
Цейтлин Л. А. — Индуктивности шин прямоугольного сечения при резко выраженном поверхностном эффекте	11	43
Гинзбург С. А. — Построение нелинейного четырехполюсника с заданной характеристикой	11	51
Пинцов А. М. — Приближенный метод расчета гармоник выпрямленного тока и напряжения в энергетических вентильных схемах	12	9
Ионкин П. А. — Об одном преобразовании нелинейных цепей	12	21

2. ПРОИЗВОДСТВО И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Казанский В. Е. и **Стернинсон Л. Д.** — Телерегулирование частоты и мощности в энергосистемах	1	50
Плюгачев В. К. — Электрические нагрузки сельскохозяйственных районов	1	71
Чалидзе И. М., **Уманский Б. З.** и **Кудрявцев К. А.** — Братская гидроэлектростанция	2	5
Хачатуров А. А. — Ударные токи и моменты при несинхронном включении генераторов	2	21
Вексельман О. Г. — Расположение проводов и тросов по условиям «пляски»	2	55
Дарченко В. Е. и **Степнов Т. В.** — Защита от замыкания на землю в компенсированных сетях	2	66
Сатаров В. А. — Расчет короткого замыкания при продольной несимметрии	3	54
Паутин Н. В. и **Яковлев А. Ф.** — Автоматизация регулирования частоты и активной мощности	3	58
Сапир Е. Д. — Влияние емкостной проводимости линий на работу высокочастотной дифференциально-фазной защиты	3	65
Герцик А. К., **Калинин Е. В.**, **Корсунцев А. В.** и **Мерхалев С. Д.** — Защитная арматура гирлянд изоляторов воздушных линий	3	69
Уманский Б. З. и **Чалидзе И. М.** — Горьковская гидроэлектростанция	4	5
Малов В. С. — Телемеханизация энергосистем и развитие средств телемеханики	4	45
Микуцкий Г. В. — Особенности работы высокочастотных каналов дифференциально-фазной защиты на длинных линиях электропередачи	4	48
Рышковский И. Я. и **Нечаев Н. А.** — О некоторых вопросах внедрения автоматики и телемеханики	4	70
Менделеев И. С. — Устойчивое регулирование напряжения генераторов постоянного тока	4	74
Мотыгина С. А. и **Сольский В. Л.** — Несинхронное включение электростанций	4	80
Акопян А. А., **Ларионов В. П.** и **Торосян А. С.** — К вопросу о влиянии формы волны напряжения на электрическую прочность воздушного промежутка	5	14
Бургсдорф В. В., **Беляков Н. Н.** и **Муравлева Н. В.** — Исследование перенапряжений, вызванных колебаниями при срезе волны	5	21
Розовский Ю. А., **Марченко Е. А.** и **Андреюк В. А.** — О самораскачивании и самовозбуждении компенсированных синхронных компенсаторов	5	59
Гольцман М. Н. — О сушке силовых трансформаторов	5	72
Лухтанов Ф. В. и **Гордзиевич И. С.** — Каховская гидроэлектростанция	6	5
Морозов А. А. — Определение нагрузочного и аварийного резервов	6	43
Шишман Д. В. — Защита сельских электроустановок от атмосферных перенапряжений	6	47
Нейман Л. Р., **Глинтерник С. Р.**, **Емельянов А. В.** и **Шипулина Н. А.** — Групповое соединение вентилей как метод повышения надежности работы мощных преобразователей	6	54
Чеботарев Е. В. — О регулировании отсасывающей сети трамваев	6	70
Батаногов В. В., **Успенский Ю. М.** и **Филаретов С. Н.** — Княжегубская гидроэлектростанция	7	6
Глазунов А. А. — Неотложные задачи теории городских электрических сетей	7	10
Левитов В. И. и **Попков В. И.** — О реактивном эффекте короны переменного тока	7	24
Атабеков Г. И. — Применение магнитоэлектрических и поляризованных реле в схемах релейной защиты	7	29
Михайлов В. В. — О некоторых параметрах морских линий электропередачи	7	41
Гогичаишвили П. Ф. — К методике расчета городских распределительных сетей	7	43
Артемьев Д. Е., **Марченко Е. А.** и **Поляк Г. И.** — Установки продольной емкостной компенсации в сетях 110 и 220 *кв*	8	33
Вайнер А. Л. и **Фертик С. М.** — Импульсные характеристики протяженных заземлителей в плохо проводящих грунтах	8	40

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Авторы, названия материалов.	№ журнала	Стр.
Двоскин Л. И. — Объективный метод оценки схем электрических соединений	8	47
Дерман Б. А., Траубенберг С. Л. и **Успенский Ю. М.** — Нарвская гидроэлектростанция	9	1
Ермоленко В. М. и **Петров С. Я.** — Влияние емкостной компенсации на работу релейной защиты	9	48
Вексельман О. Г. — Расчет опор и проводов линий электропередачи по предельному состоянию	9	53
Байрам-Заде А. Б. — Автоматическое повторное включение без проверки синхронизма	9	79
Трофименко Д. Е. — Динамическая устойчивость дальней электропередачи при пропорциональном регулировании возбуждения	10	1
Крачковский Н. Н. — О номинальных напряжениях для дальних электропередач	10	6
Горнштейн В. М. — Условия восстановления синхронизма после нарушения устойчивости	10	12
Росман Л. В. — Возбуждение гидрогенераторов по схеме без подвозбудителей	10	19
Горушкин В. И. и **Голембо З. Б.** — Метод приближенного определения асимметрии напряжений и токов на подстанциях, питающих несимметричные нагрузки	10	22
Плюгачев В. К. и **Исаенко А. В.** — Оптимальный угол ответвлений в электрических сетях	11	76
Назаров Ю. Г. — Фазочувствительная схема как орган направления мощности	11	55
Крикунчик А. Б. — Применение автотрансформаторов в электрических сетях	11	1
Бургсдорф В. В. — Исследование грозозащиты линий электропередачи с тросами	11	8

По страницам технических журналов

Пофазное повторное включение линий высокого напряжения — **Гершенгорн А. И.**	1	85
Разрядные напряжения изоляторов и стержневых промежутков на больших высотах над уровнем моря — **Татевосян С. Я.**	1	86
Сети 220...380 *кв* в Западной Европе — **Червоненкис Я. М.**	2	81
Выбор поврежденной фазы на линиях электропередач — **Рибель Н. Е.**	3	83
Высшие гармонические в энергосистеме и их воздействие на работу электрооборудования — **Трейвас М. Д.**	3	85
Новые ветроэлектрические установки в Англии — **Шефтер Я. И.**	4	84
Инверторные установки на тяговых подстанциях железных дорог — **Трейвас М. Д.**	6	87
Предельные мощности при будущем развитии электроснабжения в ФРГ — **Берковский А. М.** и **Крайз А. Г.**	7	87
Автоматическое комбинированное регулирование частоты и обменной мощности — **Червоненкис Я. М.**	8	85
Ветроэлектроэнергетика за рубежом — **Андрианов В. Н.** и **Секторов В. Р.**	10	87
Проект американского стандарта минимальных изоляционных расстояний на открытых подстанциях переменного тока — **Лысков Ю. И.**	11	88
Облегченные передвижные электрические станции — **Тихомиров И. В.**	12	80

3. ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Щедровицкий Я. С. — О выборе электрического режима ферросилициевой печи	1	3
Чиликин М. Г., Соколов М. М. и **Ключев В. И.** — Регулируемый асинхронный электропривод с дросселями насыщения и подмагничиванием двигателя	1	21
Ефанов А. Г., Гуткин Б. М. и **Рейнгольд Ю. Р.** — Применение магнитных усилителей в электроприводе	2	9
Ройзен С. С. и **Гоосен К. Я.** — Применение магнитных усилителей в автоматизированных электроприводах с двигателем постоянного тока	2	59
Горьков А. А. — О схеме работы сварочных трансформаторов	2	64
Архангельский В. И. — Новая схема регулирования нагрузки электропривода блуминга	3	5
Эттингер Е. Л. и **Рейнгольд Ю. Р.** — Экспериментальное исследование динамических свойств электромашинного усилителя и определение его параметров	3	13
Кречетович Н. Н. — Электропривод с импульсным управлением скоростью асинхронного двигателя	3	23
Хализев Г. П. — Новая схема электропривода эскалаторов Московского метрополитена	3	73
Ефанов А. Г. и **Рейнгольд Ю. Р.** — Электропривод мощных экскаваторов	4	10
Яковлев В. И. — Переходные процессы в системе генератор — двигатель с управляемым возбудителем	4	16
Куницкий Н. П. — Определение параметров системы трехкаскадного электромашинного управления ослаблением потока двигателя	4	32
Сисоян Г. А. — Выбор напряжения руднотермических печей	4	37
Комаров Д. И. — О тяговых характеристиках электровозов	4	42
Адоян А. Г. — Электротракторный агрегат ХТЗ-15	4	76
Синайский М. М. — Применение двигателей двойного питания для привода гидротехнического затвора	5	5
Писарев А. Л. — Расчет дросселей насыщения для регулируемого асинхронного привода	5	10
Борисов С. К. — Электропривод шагающего экскаватора ЭШ-4/40 на постоянном токе	5	77
Кожевников К. И. — Диаграмма тока двигателя вспомогательных механизмов прокатных станов	6	15
Александров Н. Н. — Максимальный вращающий момент электромагнитной асинхронной муфты	6	22
Илюхин А. И. — Момент переключения асинхронного двигателя при контакторном управлении	6	29
Щитова В. М. и **Лебедев А. М.** — Саморегулирование трехфазной дуги при сварке плавящимся электродом	7	51
Могильников В. С. — Резонанс в асинхронных электроприводах при пульсирующей нагрузке	8	22
Золотых Б. Н. — Влияние длительности импульса на электрическую эрозию металлов	8	55
Попеляш В. Н. — К вопросу борьбы с блуждающими токами трамвая	8	72
Явлинский Н. А. — Быстродействующие вычислительные машины и автоматизация производственных процессов	9	7
Эттингер Е. Л., Гуткин Б. М. и **Бородавченко П. М.** — Современные схемы вентильного электропривода	9	32
Чуич В. Г. — Настройка статических систем автоматического регулирования	9	39
Чиликин М. Г. и **Корытин А. М.** — Электрические схемы замещения электрогидроприводов	9	43
Разумов Л. Д. — Расчет опасности электрокоррозии подземных металлических сооружений	9	67
Скобелев В. Е. — Заключительная фаза реостатного торможения	9	73
Байко В. Ф. и **Вавилов А. А.** — Переходные процессы в двухступенчатом электромашинном усилителе с самовозбуждением	10	35
Шиниберов Л. П. — О передаточной функции электромашинного усилителя с поперечным полем	10	40
Гудков В. С. — Переходные процессы в приводах с механическими дифференциалами	10	48

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Авторы, названия материалов.	№ журнала	Стр.
Разыграев А. М. — Составление многотактной схемы электропривода, работающего па автоматическому циклу	11	15
Марков Н. А. — Круговая диаграмма руднотермической дуговой электропечи	11	20
Поляк Н. А. — Инженерный расчет зоны асинхронного самовозбуждения электрической машины	11	22
Шестопалов В. Н. — Определение на фазовой плоскости возможности ресинхронизации синхронных двигателей	12	15
Березниковский С. Ф. — Реакция поперечного тока в электромашинном усилителе	12	35
Кравченко В. С. и **Фетисов П. А.** — Искробезопасность электрооборудования в атмосфере взрывчатых газовоздушных смесей	12	48
Глебов В. А. — Экспериментальное исследование пусковых процессов асинхронного двигателя	12	63
По страницам технических журналов		
Защита самолетных электрических систем — **Истратов В. Н.** и **Каменский А. В.**	2	89
Новый тип электропривода для бездисковых фрикционных прессов — **Стоколов В. Е.**	5	93
Износ контактного провода троллейбусной контактной сети — **Галонен Ю. М.**	6	86
Электрическая тяга за рубежом — **Галонен Ю. М.**	9	81
Применение керамических изоляторов для подвески контактной сети трамвая — **Галонен Ю. М.**	10	87
Применение электроэнергии в сельском хозяйстве — **Изъюров В. А.**	12	85
4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ТРАНСФОРМАТОРЫ		
Иоффе А. Б. — Об однофазном коллекторном двигателе на частоте 50 *гц* для тяги	1	26
Толмач И. М. — Расчет пусковых характеристик синхронных двигателей по схеме замещения	1	32
Мамиконянц Л. Г. — Об измерении сверхпереходных реактивных сопротивлений синхронных машин стационарными методами	2	62
Бачурин Н. И. и **Грейнер Л. К.** — Трансформаторы тока на особо высокие напряжения	3	29
Коченова А. И. и **Юдина А. А.** — Трансформаторы тока на 400 *кв* для линии электропередачи Куйбышев — Москва	3	38
Каплянский А. Е. — Трансформаторы напряжения и трансформаторы тока	3	49
Нейман З. Б. и **Шур Г. И.** — Синхронные электродвигатели для привода компрессоров	4	23
Старооскольский Н. А., Бахмутский Ф. И., Каменецкий Б. Г. и **Розенфельд В. Е.** — Бесконтактная рудничная электровозная откатка	4	28
Сухоруков Ф. Т. — Конструкция изоляции современных крупных электрических машин	4	52
Локшин Д. В. и **Нейман З. Б.** — Опыт применения холоднокатанной электротехнической стали в электрических машинах	5	46
Глаголев Г. И. — Нагрев сварочных трансформаторов и применение обдува	5	68
Нитусов Ю. Е. — Об одной схеме электромагнитного вибратора	5	81
Иносов В. Л. и **Крутикова В. Е.** — Синхронный двигатель смешанного возбуждения	6	25
Кулебакин В. С. — Об устранении асимметрии намагничивающих сил в конденсаторных асинхронных двигателях	7	15
Вегнер О. Г. — Вопросы современной теории — коммутации тока в коллекторных машинах	7	19
Тер-Газарян Г. Н. — Тепловые напряжения в корпусе гидрогенераторов	7	47
Горяинов Ф. А. и **Гусев С. Я.** — Двухступенчатый электромашинный усилитель продольного поля с самовозбуждением	8	18
Козырев Н. А. и **Литвинова Е. Л.** — Об электрической прочности витковой изоляции высоковольтных электрических машин	8	68
Каган Я. И. и **Богданов О. И.** — Измерение толщины масляной пленки в подпятнике вертикального электродвигателя	8	74
Ломонос Г. К. — Охлаждение электродвигателей водой	8	77
Булгаков А. А. — Закон экономичного регулирования электрических машин	10	27
Беляев Л. Н. — Универсальные внутренние нагрузочные характеристики машин постоянного тока	10	33
Тур Б. К. — К вопросу коммутации в машинах постоянного тока	11	30
Неболюбов Ю. Е. — Фотоэлектрический метод исследования и настройки коммутации	11	34
Курдиани И. С. и **Хомерики О. К.** — Об особенностях работы устройства компаундирования синхронных генераторов	11	62
Пястолов А. А. — К определению напряжения сушки трансформаторов	11	65
Скугоров В. Н. — Авторегулируемый генератор	11	74
По страницам технических журналов		
Испытания изоляции электрических машин выпрямленным напряжением — **Ванин Б. В.**	1	88
Повышение удельной мощности турбогенераторов — **Берковский А. М.**	4	89
Сглаживающие устройства на электровозах однофазного тока с ртутными выпрямителями — **Трейвас М. Д.**	5	89
Локомотив на атомной энергии — **Изъюров В. А.**	7	92
Развитие методики импульсных испытаний трансформаторов — **Фрид Е. С.**	8	86
Сушка электрических машин — **Кулаковский В. Б.**	9	85
5. АППАРАТЫ, ПРИБОРЫ, ИЗМЕРЕНИЯ		
Башарин А. В. — Расчет характеристик магнитного усилителя при намагничивании постоянным и переменным полями	1	17
Аронович И. С. — Разъединитель на 400 *кв* для электропередачи Куйбышев — Москва	1	36
Дроздов А. Д. — Трансформаторные направленные, дифференциальные и дистанционные реле	1	41
Пшеничников А. М. — Применение магнитных нуль-органов в телеизмерительных и регистрирующих устройствах	1	55
Аронович И. С. и **Гуревич В. В.** — Обзор конструкций разъединителей на 380...400 *кв*	1	60
Гурвич Е. И. — Измерение свойств магнитно-мягких материалов мостовым методом	1	64
Дунаевский С. Я. — Конструктивная постоянная магнитных усилителей	2	15
Грейнер Л. К. и **Афанасьев В. В.** — Конструкции выключателей на 380...400 *кв*	2	27
Пузырийский Г. С. и **Бирюков С. В.** — Исследование дугогасительной способности разъединяющего устройства воздушного выключателя на 400 *кв*	2	32
Бутаев Ф. И. и **Масленников Н. М.** — Распределение тока между параллельно включенными анодами и вентилями	2	37
Чернышев Н. М. — Об учете апериодической составляющей в отключаемом токе	2	42
Козырев Б. П. — Фотоэлектрооптический и термоэлектрооптический усилители	2	47
Безруков Ф. В. — Трубчатые разрядники типа РТВ	3	45
Ратгауз И. И. — Стабилизированные селеновые выпрямительные устройства	4	55

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Авторы, названия материалов.	№ журнала	Стр.
Шмайн Ю. А. — Расчет схемы зажигания игнитронов	4	61
Пашин М. Ф. — Делитель напряжения для генератора импульсных напряжений большой мощности	5	26
Каплан В. В. и **Нашатырь В. М.** — Испытание высоковольтных токоограничивающих предохранителей на колебательном контуре	5	38
Кузнецов Р. С., Ермолаев И. Н. и **Гамлицкая С. В.** — Повышение износоустойчивости контактов пускателей	5	43
Юдицкий С. Б. и **Немчин С. Е.** — Выпрямитель для электровоза узкой колеи	5	55
Горожанкин И. И. — Выбор параметров зеркального гальванометра	5	63
Голубчик Г. Н. и **Сена Л. А.** — Роль ртутных капель в возникновении обратных зажиганий	6	60
Пименов В. П. и **Поссе А. В.** — Опрокидывание инвертора	6	65
Бугаев Г. А. — О стабильности выдержки времени электромагнитных реле времени	6	81
Фабрикант В. Л. — Оптимальная схема детекторного направленного реле сопротивления	7	36
Поюровский М. Е. — Графоаналитический расчет характеристик двухтактных магнитных усилителей	7	57
Балыгин И. Е. — О скользящих разрядах по поверхности трансформаторного масла	7	63
Голодолинский Г. В. — Применение эффекта Фарадея для измерения токов	8	1
Горюнов П. Н. и **Кольцов А. А.** — Индуктивность контура тока в диске индукционного прибора	8	15
Соколов А. А. — Сериесный катодный повторитель	8	27
Максимович Н. Г. — О температурной компенсации нелинейных сопротивлений	8	58
Дольницкий Б. Н. — Новый метод массовой проверки счетчиков электрической энергии	8	65
Брук И. С. — Быстродействующая электронная вычислительная машина М-2	9	14
Новицкий П. В. и **Фетисов М. М.** — Расчет магнитного сопротивления цепей с переменной площадью сечений	9	60
Бальян Р. Х. — Расчет магнитных усилителей с обратной связью	9	63
Каляев А. В. — Измерительный трансформатор постоянного напряжения	10	24
Таев И. С. — К расчету электрической дуги переменного тока	10	57
Скитальцев В. С. и **Элькинд Ю. М.** — Самопишущие приборы для записи переходных процессов	10	61
Лапченко Ю. Е. — Опыт эксплуатации ртутных выпрямителей с глубоким сеточным регулированием	10	70
Быховский Д. Г. и **Каплан М. И.** — Дроссели насыщения в сварочных преобразователях с полупроводниковыми выпрямителями	10	74
Донской А. В. и **Ивенский Г. В.** — Стабилизированный тиратронный выпрямитель с амплитудным регулированием	11	37
Коган М. Г. — Взаимное влияние процессов в электромагнитных полях при индукционном нагреве	12	59
Сергеев П. В. — Вольтамперные характеристики электрической дуги постоянного и переменного токов	12	25
Климов Н. С. — О перспективах дуговых вентилей и о механических выпрямителях	12	5
Масленников Н. М. — Расчет анодных делителей тока	12	18
Могилевский Г. В. — К расчету электромагнитов постоянного тока с внешним поворотным якорем	12	40
Нечаев Г. К. — Термосопротивление как датчик температуры в схеме с логометром	12	52
По страницам технических журналов		
Отключение малых токов выключателями высокого напряжения — **Волькенау В. А.**	2	84
Точные измерения значений тока, напряжения и мощности на переменном токе — **Капник М. Ш.**	2	87
Мощные полупроводниковые выпрямители — **Здрок А. Г.**	3	81
Импульсный разряд в длинном воздушном промежутке при атмосферном давлении — **Ларионов В. П.** и **Разевиг Д. В.**	4	86
Баковые масляные выключатели 300 *кв* — **Якуб Ю. А.**	5	91
Установки для испытаний выключателей высокого напряжения — **Гершенгорн А. И.**	6	84
Применение полупроводниковых выпрямителей в сварочной технике — **Щитова В. М.**	8	87
Стабилизация импульсной волны — **Калинин Е. В.**	9	85
Новые приборы для испытания изоляционных материалов — **Богуславский П. С.**	11	90
6. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, КАБЕЛИ, ДЕТАЛИ		
Богородицкий Н. П., Рейнов Н. М. и **Черняев Ю. С.** — Образцовый газонаполненный конденсатор на напряжение 100 *кв*	1	68
Нечаев Г. К. — Измерения температуры серийными термосопротивлениями	4	65
Андрианов К. А. и **Соколов Н. Н.** — Термоэластичность кремнийорганических диэлектриков	6	31
Коломиец Б. Т. и **Олеск А. О.** — Характеристики фотосопротивлений из поликристаллического сульфида кадмия	6	35
Привезенцев В. А. — Обмоточные провода	6	39
Дружинин В. В. и **Бурдакова Ю. П.** — О соотношении потерь на гистерезис и вихревые токи в электротехнической стали	8	50
Бочкарева Б. А. — Постоянные непроволочные сопротивления	8	60
Федченко И. К., Иерусалимов М. Е., Андрияшев К. Я. и **Маркевич В. П.** — Опыт рентгеноскопии высоковольтных изоляторов	8	78
Евсеев В. И. — Ферриты	9	23
Вербицкая Т. Н. — Технические применения варикондов	11	68
По страницам технических журналов		
Неразрушающие испытания материалов рентгеновскими лучами, получаемыми от бетатрона — **Калинин Е. В.**	2	88
Зарубежное силовое конденсаторостроение — **Ренне В. Т.**	3	75
Применение полупроводящей глазури на фарфоровых изоляторах — **Калинин Е. В.**	10	90
Кабели с алюминиевой оболочкой на судах голландского флота — **Гуревич В. З.**	10	92
7. ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ		
Казанцев А. Н. — Александр Степанович Попов	1	1
Стекольников И. С. — Вениамин Франклин	1	75
Веселовский О. Н. — О некоторых работах М. О. Доливо-Добровольского	1	78
Белькинд Л. Д. — Александр Ильич Шпаковский	6	83
Глазанов В. Н. — Великий сын югославского народа (К 100-летию со дня рождения Николы Теслы)	7	66

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Авторы, названия материалов.	№ журнала	Стр.
Нейман Л. Р., Рахимов Г. Р. и Янко-Триницкий А. А. — К 125-летию открытия Фарадеем закона электромагнитной индукции	8	80
Белькинд Л. Д. — К 75-летию установления международных электрических единиц	8	82
Белькинд Л. Д. — Томас Альва Эдисон. К 25-летию со дня смерти	10	77
Лежнева О. А. — Труды Ш. О. Кулона в области электричества и магнитизма (К 150-летию со дня смерти)	11	79
Мартинец Н. В. — Работы С. П. Власова в области учения о гальванических элементах	12	68
8. СТАНДАРТЫ И НОРМЫ		
Плис Г. С. — Испытания электродвигателей и трансформаторов	4	82
Плис Г. С. — О новых стандартах на электрические машины	11	82
9. ДИСКУССИИ		
Основные вопросы проектирования районных подстанций с тремя напряжениями — **Бугринов Е. А.**	1	83
Поле как вид материи — **Смирнов Г. П., Брон О. Б.** От редакции	2	71
О выборе расчетного значения потери напряжения в осветительных сетях промышленных предприятий — **Гольденблат Б. И., Архипов Н. К.**	2	74
Испытание изоляции крупных трансформаторов — **Звездкин В. Н., Надельсон Р. Г.**	7	70
О сушке трансформаторов и некоторые требования эксплуатации к трансформаторостроению — **Сыромятников И. А.**	7	73
К итогам дискуссии о включении трансформаторов без сушки — **Ашрятов А. К.** От редакции	7	75
О применении схемы куметра для измерения малых добротностей — **Айзенштейн А. И., Нетушил А. В.**	12	69
О технико-экономическом сравнении городских электрических сетей — **Кудряшов С. А., Козлов В. А., Айзенберг Б. Л.**	12	71
Неотложные задачи теории городских электрических сетей — **Гланц Ю. А., Фингер Л. М., Никогосов С. Н., Медведский Н. И., Волоцкой Н. В., Бессмертный И. С., Воронцов Ф. Ф.**	12	73
10. ЗА РУБЕЖОМ		
Татко Б. С. — Британская энергетика и энергопромышленность	1	89
Чупраков Н. М. — Об энергетике Франции	2	76
Лысков Ю. И. — Десять лет польской энергетики	3	86
Лысков Ю. И. — Развитие энергетических ресурсов Югославии	4	86
Крикунчик А. Б. — Энергетика Швеции	5	85
Ван Тай-чжун — Энергетика Китайской Народной Республики	5	89
Сербиновский Г. В. и Роддатис К. Ф. — Некоторые данные об энергетике Федеративной Республики Германии	7	82
Чупраков Н. М. — Энергетика Индии	10	83
Олейник И. П., Электроэнергетическая промышленность Румынской Народной Республики	11	86
11. ЗАМЕТКИ И ПИСЬМА		
О номограмме для решения алгебраического трехчленного уравнения — **Новиков А. П.**	1	84
О методах расчета нелинейных цепей — **Куренев С. И., Меерович Э. А.**	8	91
О книге А. А. Климова «Электрификация производственных процессов в животноводстве» — **Ефимов В. И., Худяков Н. В., Сбитнев Л. П., Романовский В. Э., Холин И. Р.**	9	87
Недооценка вопросов электрификации сельского хозяйства — **Коновалов В. Н.**	9	88
К вопросу испытания срезанной волной — **Пашин М. Ф.**	9	89
К вопросу о расчете осветительных сетей по потере напряжения — **Кнорринг Г. М.**	10	81
Правила устройства электротехнических установок должны быть едиными — **Шухатович М. Ю.**	10	82
Нужно ли заземлять корпуса электрических машин в учебных лабораториях — **Юматов А. А., Крутицкий Ю. Е.**	10	82
Обнаружение дефектных изоляторов посредством индикации излучения — **Винокуров В. И., Сви П. М.**	11	86
Об электротехнических нормах для горнодобывающей промышленности — **Цверава Г. К.** От редакции	12	78
12. ХРОНИКА		
Информации		
Всесоюзное научно-техническое совещание по электрификации железных дорог	1	91
Объем телемеханизации энергетических систем	1	93
Закавказская конференция читателей журнала «Электричество»	2	90
Совещание по выключателям высокого напряжения	2	91
Основные положения для разработки типовых проектов подстанций 110 и 35 *кв*	2	91
В научно-техническом обществе энергетической промышленности	3	87
Научно-техническое совещание по энергетическим маслам	3	88
Юбилейные дни МЭИ	3	88
Диссертации ЛЭТИ	3	90
Совещание по электроконструкциям в Новосибирске	4	91
Конференция по измерительной технике во Львове	5	94
Вариконды. Научно-техническое совещание в Ленинграде	6	90
В Комитете по электроэнергии ООН	6	92
Конференция читателей журнала «Электричество» в Ростове-на-Дону	6	92
Конференция по полупроводниковым выпрямителям	6	93
Московская конференция читателей журнала «Электричество»	7	95
Научно-техническая конференция в Ивановском энергетическом институте им. Ленина	8	93
Совещание по магнитным усилителям	10	93
В Ленинградском НТО им. А. С. Попова	10	93
Передача электроэнергии на дальние расстояния. Сессия в ЭНИН и конференция в ЛПИ	11	92
Научно-техническое совещание по трансформаторам в Запорожье	11	95
Конгресс в Белграде в связи с юбилеем Теслы	12	88
Юбилеи		
75-летие А. Ф. Иоффе	1	93
Профессор П. В. Шмаков	1	94
Профессор Б. П. Козырев	1	94
Профессор Б. В. Романовский	2	92
Инженер Н. А. Тищенко	3	89
Профессор О. Б. Брон	5	94
Профессор В. С. Пантюшин	7	93
Профессор Л. Д. Белькинд	8	93
Профессор Б. М. Тареев	8	94

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Авторы, названия материалов.	№ журнала	Стр.
Некрологи		
Памяти Сергея Ивановича Вавилова	1	90
Н. В. Горохов	1	95
Ф. Н. Шклярский	5	95
Академик Василий Петрович Никитин	6	94
А. В. Берендеев	7	94
А. Л. Матвеев	7	94
М. Г. Башкова	9	90
А. А. Морозов	12	88
13. БИБЛИОГРАФИЯ		
Книга И. А. Будзко «Сельские электрические сети» — **Холмский В. Г.**	1	95
Книга А. А. Воробьева «Сверхвысокие электрические напряжения» — **Глазанов В. Н.**	2	93
Книга П. С. Сергеева «Электрические машины» — **Зотов В. П.**	2	95
Книга П. Ковача, И. Раца «Переходные процессы в машинах переменного тока» — **Поош Иштван**	2	96
Книга Н. Н. Белоруссова и В. Н. Красоткина «Силовые кабели» — **Брагин С. М.**	3	93
Книга Г. Блашке «Защита электродвигателей» — **Цверава Г. К.**	3	94
Книга А. А. Климова «Электрификация производственных процессов в животноводстве» — **Зильберман Б. З.** (см. также № 9, стр. 87)	3	95
Книга С. А. Гусева «Очерки по истории развития электрических машин» — **Штурман Г. И.** и **Апсит В. В.**	4	92
Книга М. Г. Чиликина, А. М. Корытина и В. Н. Прокофьева «Силовой электрогидропривод» — **Барсуков А. А.** и **Зусман В. Г.**	5	95
Книга И. Л. Ковальского «Электрооборудование обогатительных фабрик» — **Грейсух М. В.**	6	96
Книга М. В. Рогали-Левицкого и А. Я. Рябкова «Электрические станции и трансформаторные подстанции железнодорожного транспорта — **Дон-Яхио А. Б.** и **Терешкович С. А.**	7	96
Книга С. М. Брагина «Электрический кабель» — **Кожевников Б. А.** и **Михайлов М. М.**	7	98
Книга М. М. Соколова «Электропривод и электроснабжение промышленных предприятий» — **Альтман С. Я., Синицын О. А.** и **Силаев Э. Ф.**	8	95
Книга К. В. Егорова «Основы автоматического регулирования» — **Ивахненко А. Г.**	9	95
Книга В. Ю. Гессена «Аварийные режимы и защита от них в сельскохозяйственных электросетях» — **Юрасов В. В., Пронникова М. И., Сергованцев В. Т.** и **Слепян Я. Ю.**	10	93
Книга С. Г. Гинзбурга «Методы решения задач по переходным процессам в электрических цепях» — **Атабеков Г. И.**	10	95
Книга В. Е. Одинцова «Справочник сельского электротехника» — **Коновалов В. Н.**	11	96
Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике (списки книг опубликованы в № 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10; 11 и 12).		
14. РАЗНЫЕ СТАТЬИ		
Резников Ф. А. — Операция с комплексными числами при помощи логарифмической линейки	4	94
Певницкий В. П. и **Ильгекит Ф. Э.** — Характеристики системы подавления радиопомех	6	73
Кононов В. П. — Модель для исследования гидравлических режимов теплофикационных систем	6	78

II. Алфавитный указатель авторов

А

Адоян А. Г. 4, 76
Айзенберг Б. Л. 12, 71
Айзенштейн А. И. 12, 69
Акопян А. А. 5, 14
Александров Н. Н. 6, 22
Алиев М. Н. 3, 88
Альтман С. Я. 8, 95
Андреев С. Я. 6, 1
Андреюк В. А. 5, 59
Андрианов К. А. 6, 31
Андрианов В. Н. 10, 87
Андрияшев К. Я. 8, 78
Апсит В. В. 4, 92
Аронович И. С. 1, 36; 1, 60
Артемьев Д. Е. 8, 33
Архангельский В. И. 3, 5
Архипов Н. К. 2, 74
Атабеков Г. И. 7, 29; 10, 95
Афанасьев В. В. 2, 27

Б

Байко В. Ф. 10, 35
Байрам-Заде А. Б. 9, 79
Балыгин И. Е. 7, 63
Бальян Р. Х. 9, 63
Барсуков А. А. 5, 95
Батаногов В. В. 7, 6
Бахмутский Ф. И. 4, 28
Бачурин Н. И 3, 29
Башарин А. В. 1, 17
Безруков Ф. В. 3, 45
Белоногов Г. Г. 6, 51
Беляев Л. Н. 10, 33
Беляков Н. Н. 5, 21
Белькинд Л. Д. 6, 83; 8, 82; 10, 77
Березниковский С. Ф. 12, 35
Берковский А. М. 4, 89; 7, 87
Берлин С. Н. 8, 93
Бессмертный И. С. 12, 73
Бирюков С. В. 2, 32
Богданов О. И. 8, 74
Богородицкий Н. П. 1, 68
Богуславский П. С. 11, 90
Борисов С. К. 5, 77
Бородавченко П. М. 9, 32
Бочкарев Б. А. 8, 60
Брагин С. М. 3, 93
Брон О. Б. 2, 71
Брук И. С. 9, 14
Бугаев Г. А. 6, 81
Бугринов Е. А. 1, 83
Булгаков А. А. 10, 27
Бургсдорф В. В. 5, 21; 11, 8
Бурдакова Ю. П. 8, 50
Бутаев Ф. И. 1, 37
Быховский Д. Г. 10, 74

В

Вавилов А. А. 10, 35
Вайнберг Г. С. 12, 55
Вайнер А. Л. 8, 40
Ванин Б. В. 1, 88
Ван Тай-чжун 5, 89
Вегнер О. Г. 7, 19;
Вексельман О. Г. 2, 55; 9, 53
Вербицкая Т. Н. 6, 90; 11, 68
Веселовский О. Н. 1, 78
Винокуров В. И. 11, 86
Волоцкой Н. В. 12, 73
Волькенау В. А. 2, 84
Воронов Р. А. 8, 11
Воронцов Ф. Ф. 12, 73
Вул Б. М. 1, 90

Г

Галонен Ю. М. 6, 86; 9, 81; 10,87
Гамлицкая С. В. 5, 43
Геллер И. Х. 6, 93
Герцик А. К. 3, 69
Гершенгорн А. И. 1, 85; 6, 84
Гесселев А. М. 11, 95
Гинзбург С. А. 11, 51
Глаголев Г. И. 5, 68
Глазанов В. Н. 2, 93; 7, 66
Глазунов А. А. 7, 10
Гланц Ю. А. 12, 73
Глебов В. А. 12, 63
Глинтерник С. Р. 6, 54
Гогичаишвили П. Ф. 7, 43
Гогуа Л. К. 2, 91
Голембо З. Б. 10, 22
Голодолинский Г. В. 8, 1
Голубчик Г. Н. 6, 60
Гольденблат Б. И. 2, 74
Гольцман М. Н. 5, 72
Гоосен К. Я. 2, 59
Гордзиевич И. С. 6, 5
Горнштейн В. М. 10, 12
Горожанкин И. И. 5, 63
Горушкин В. И. 10, 22; 11, 92
Горюнов П. Н. 8, 15
Горяинов Ф. А. 8, 18
Горьков А. А. 2, 64
Грейнер Л. К. 2, 27; 3, 29
Грейсух М. В. 6, 96
Губанов М. И. 10, 53
Гудков В. С. 10, 48
Гурвич В. В. 1, 60
Гурвич Е. И. 1, 64
Гуревич В. З. 10, 92
Гусев С. Я. 8, 18
Гуткин Б. М. 2, 9; 9, 32

Д

Дарченко В. Е. 2 66
Двоскин Л. И. 8, 47
Дерман Б. А. 9, 1
Дольницкий Б. Н. 8, 65
Донской А. В. 11, 37
Дон-Яхио 7, 96
Дорофеев Г. И. 8, 31
Дроздов А. Д. 1, 41
Дружинин В. В. 8, 50
Дунаевский С. Я. 2, 15

Е

Евсеев В. И. 9, 23
Егоров П. М. 5, 31
Емельянов А В. 6, 54
Ермолаев И. Н. 5, 43
Ермоленко В. М. 9, 48
Ефанов А. Г. 2 9; 4, 10
Ефимов В. И. 9, 87

Ж

Жуковский В. И. 3, 87

З

Залесский Л. М. 2, 91
Звездкин В. Н. 7, 70
Здрок А. Г. 3, 81; 10, 22
Зейлидзон Е. Д. 1, 93
Зильберман Б. З. 3, 95
Золотых Б. Ц. 8, 55
Зотов В. П. 2, 95
Зусман В. Г. 5, 95

И

Иванов И. И. 1, 91
Иванова Н. Л. 3, 88

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Ивахненко А. Г. 9 95
Ивенский Г. В. 11, 37
Иерусалимов М. Е. 8, 78
Изъюров В. А. 7, 92; 12, 85
Илюхин А. И. 6, 29
Ильгекит Ф. Э. 6, 73
Иносов В. Л. 6, 25
Ионкин П. А. 12, 12
Иоффе А. Б. 1, 26
Исаенко А. В. 11, 75

К

Каган Я. И. 8, 74
Казанский В .Е. 1, 50
Калинин Е. В. 2, 88; 3, 69; 9, 85; 10, 90
Каляев А. В. 10, 24
Каменецкий Б. Г. 4, 28
Каплан В. В. 5, 38; 10, 74
Каплянский А. Е. 1, 49; 12, 30
Капник М. Ш. 2, 87
Климов Н. С. 12, 55
Ключев В. И. 1, 21
Кляцкин И.Г. 7, 61
Кнорринг Г. М. 10, 81
Коган М. Г. 12, 59
Кожевников К. И. 6, 15; 7, 98
Козлов В. А. 12, 71
Козырев Б. П. 2, 47
Козырев Н. А. 8, 68
Коломиец Б. Т. 6, 35
Кольцов А. А. 8, 15
Комаров Д. И. 4, 42
Коновалов В. Н. 9, 88; 11, 96
Кононов В. П. 6, 78
Корсунцев А. В. 3 69
Корытин А. М. 9, 43
Коченова А. И. 3, 38
Кравченко В. С. 12, 48
Крайз А. Г. 7, 87
Крачковский Н. Н. 10, 6
Кречетович Н. Н. 3, 23
Крикунчик А. Б. 5, 85; 11, 1
Крутикова В. Е. 6, 25
Крутицкий Ю. Е. 10, 82
Кудрявцев К. А. 1, 5
Кудряшов С. А. 12, 71
Кузнецов Р. С. 5, 43
Кулаковский В. Б. 9, 85
Кулебакин В. С. 7, 15
Куницкий Н. П. 4, 32
Куренев С. И. 6, 9; 8, 91
Курдиани И. С. 11, 62
Курчатов И. В. 7, 1

Л

Лапченко Ю. Е. 10, 70
Ларионов В. П. 4, 86; 5, 14
Лебедев А. М. 7, 51
Левит Г. О. 11, 95
Левитов В. И. 7, 24
Лежнева О. А. 11, 79
Липман Д. А. 1, 8
Литвинова Е. Л. 8, 68
Локшкин Д. В. 5, 46
Ломонос Г. К. 8, 77
Лухтанов Ф. В. 6, 5
Лысков Ю. И. 3, 86; 4, 86; 11, 88

М

Максимович Н. Г. 8, 58
Малов В. С. 4, 45
Мамиконянц Л. Г. 2, 62
Мамонтов О. В. 8, 4
Маркевич В. П. 8, 78
Марков Н. А. 11, 20
Мартинец Н. В. 12, 68
Марченко Е. А. 5, 59; 8, 33
Масленников Н. М. 1, 37; 12, 18
Медведский Н. И. 12, 73
Меерович Э. А. 8, 91
Менделеев И. С. 4, 74
Мерхалев С. Д. 3, 69
Микуцкий Г. В. 4, 48
Миронов Е. П. 6, 92
Михайлов В. В. 7, 41
Михайлов М. М. 7, 98
Могилевский Г. В. 12, 40
Могильников В. С. 8, 22
Морозов А. А. 6, 43
Мотыгина С. А. 4, 80
Муравлева Н. В. 5, 21

Н

Надельсон Р. Г. 7, 70
Назаров Ю. Г. 11, 55
Наточин В. М. 4 91
Нашатырь В. М. 5, 38
Неболюбов Ю. Е. 11, 34
Негневицкий И. Б. 1, 8; 10, 93
Нейман З. Б. 4, 23; 5, 46
Нейман Л. Р. 6, 54; 8, 80
Немчин С. Е. 5, 55
Нетушил А. В. 12, 69
Нечаев Г. К. 4, 65; 12, 52
Нечаев Н. А. 4, 70
Никогосов С. Н. 12, 73
Нитусов Ю. Е. 5, 81
Новиков А. П. 1, 84
Новицкий П. В. 9, 60

О

Олейник И. П. 11, 86
Олеск А. О. 6, 35

П

Паутин Н. В. 3, 58
Пашин М. Ф. 5, 26; 9, 89
Певницкий В. П. 6, 73
Петров С. Я. 9, 48
Пименов В. П. 6, 65
Пинцов А. М. 12, 9
Писарев А. Л. 5, 10
Плис Г. С. 4, 82; 11, 82
Плюгачев В. К. 1, 71; 11, 76
Поляк Г. И. 8, 33
Поляк Н. А. 11, 23
Поош Иштван 2, 96
Попеляш В. Н. 8, 72
Попков В. И. 7, 24
Поссе А. В. 6, 65
Поюровский М. Е. 7, 57
Привезенцев В. А. 6, 39
Пронникова М. И. 10, 93
Пузырийский Г. С. 2, 32
Пшеничников А. М. 1, 55
Пястолов А. А. 11, 65
Пятин Ю. М. 4, 67

Р

Разевиг Д. В. 4 86
Разумов Л. Д. 9, 67
Разыграев А. М. 1, 15
Ратгауз И. И. 4, 55
Рахимов Г. Р. 8, 80
Резников Ф. А. 4, 94
Рейнгольд Ю. Р. 2, 9; 3, 13; 4, 10
Рейнов Н. М. 1, 68
Ренне В. Т. 3, 75
Рибель Н. Е. 3, 83
Роддатис К. Ф. 7, 82
Розенфельд В. Е. 4, 28
Розовский Ю. А. 5, 59
Ройзен С.С. 2, 59
Романовский В. Э. 9, 87
Росман Л. В. 10, 19
Рышковский И. Я. 4, 70

С

Савин В. В. 3, 88
Сапир Е. Д. 3, 65
Сатаров В. А. 3, 54
Сбитнев Л. П. 9, 87
Сви П. М. 11, 86
Секторов В. Р. 10, 87
Сена Л. А. 6, 60
Сербиновский Г. В. 6, 92; 7, 82
Сергеев А. С. 3, 90; 9, 91
Сергеев П. В. 12, 25
Сергованцев В. Т. 10, 93
Сигорский В. П. 5, 94
Силаев Э. Ф. 8, 95
Синайский М. М. 5. 5
Синицын О. А. 8, 95
Сисоян Г. А. 4, 37
Скитальцев В С. 10, 61
Скобелев В. Е. 9, 73
Скугоров В. Н. 11, 74
Слепян Я. Ю. 10, 93
Смирнов Г. П. 2 71; 10, 44
Соколов А. А. 8, 27
Соколов М. М. 1, 21
Соколов Н. Н. 6, 31
Сольский В. Л. 4, 80
Старооскольский Н. А. 4, 28
Стекольников И. С. 1, 75
Степнов Т. В. 2, 66
Стернинсон Л. Д. 1,50
Стоколов В. Е. 5, 93
Сухоруков Ф. Т. 4, 52
Сыромятников И. А. 7, 73

Т

Таев И. С. 10, 57
Талышинский И. Т. 6, 11
Татевосян С. Я. 1, 86
Тер-Газарян Г. Н. 7, 47
Терешкович С. А. 7, 96
Тимофеев Б. Б. 5, 50; 10, 66
Тихомиров И. В. 12, 80
Толмач И. М. 1, 32
Торосян А. С. 5, 14
Траубенберг С. Л. 9, 1
Трейвас М. Д. 3, 85; 5, 89; 6, 87
Трофименко Д. Е. 10, 1
Тур Б. К. 11, 30

У

Уманский Б. З. 1, 5; 4, 5
Успенский Ю. М. 7, 6; 9, 1

Ф

Фабрикант В. Л. 7, 36
Федченко И. К. 8, 78
Фертик С. М. 8, 40
Фетисов М. М. 9, 60
Фетисов П. А. 12, 48
Филаретов С. Н. 7, 6
Фингер Л. М. 12, 73
Фрид Е. С. 8, 86

Х

Хализев Г. П. 3, 73
Хачатуров А. А. 2, 21
Холин И Р. 9, 87
Холмский В. Г. 1, 95
Хомерики О. К. 11, 62
Худяков Н. В. 9, 87

Ц

Цверава О. К. 3, 94; 12, 80
Цейтлин Л. А. 11, 43

Ч

Чалидзе И. М. 2, 5; 4, 5
Чеботарев Е. В. 6, 70
Червоненкис Я. М. 2, 81; 8, 85
Чернышев Н. М. 2, 42
Черняев Ю. С. 1, 68
Чиликин М. Г. 1, 21; 9 43
Чуич В. Г. 9. 39
Чумбуридзе И. П. 2, 90
Чупраков Н. М. 2, 76; 10, 83

Ш

Шестопалов В. Н. 12, 15
Шефтер Я. И. 4, 84
Шиниберов Л. П. 10, 40
Шипулина Н. А. 6, 54
Шишман Д. В. 6, 47
Шмайн Ю. А. 4, 61
Штурман Г. И. 4, 92
Шур Г. И. 4, 23
Шухатович М. Ю. 10, 82

Щ

Щедровицкий Я. С. 1, 3
Щербачев О. В. 11, 93
Щитова В. М. 7, 51; 8, 87

Э

Элькинд Ю. М. 10, 61
Эттингер Е. Л. 3, 13; 9, 32

Ю

Юдина А. А. 3, 38
Юдицкий С. Б. 5, 55
Юматов А. А. 10, 82
Юрасов В. В. 10, 93

Я

Явлинский Н. А. 9, 7
Яковлев А. Ф. 3, 58
Яковлев В. И. 4, 16
Якуб Ю. А.. 5, 91
Янко-Триницкий А. А. 8, 80

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

К. А. Андрианов, Н. И. Борисенко, Г. В. Буткевич, А. А. Глазунов, В. А. Голубцова, Н. Г. Дроздов (главный редактор), **Е. Г. Комар, М. П. Костенко, Л. Р. Нейман, И. И. Петров, В. И. Попков, И. А. Сыромятников** (зам. главного редактора), **А. М. Федосеев, М. Г. Чиликин, М. А. Шателен.**

Сдано в пр-во 15/IX 1956 г. Подписано к печати 30/XI 1956 г.
Т-11810 Бумага 60×92¹/₈ Объем 12 п. л. Уч.-изд. л. 16,5 Тираж 19 930 экз. Заказ 1532

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ТРАНСФОРМАТОРЫ для ГЕНЕРАТОРОВ
до самых крупных размеров и наивысших напряжений

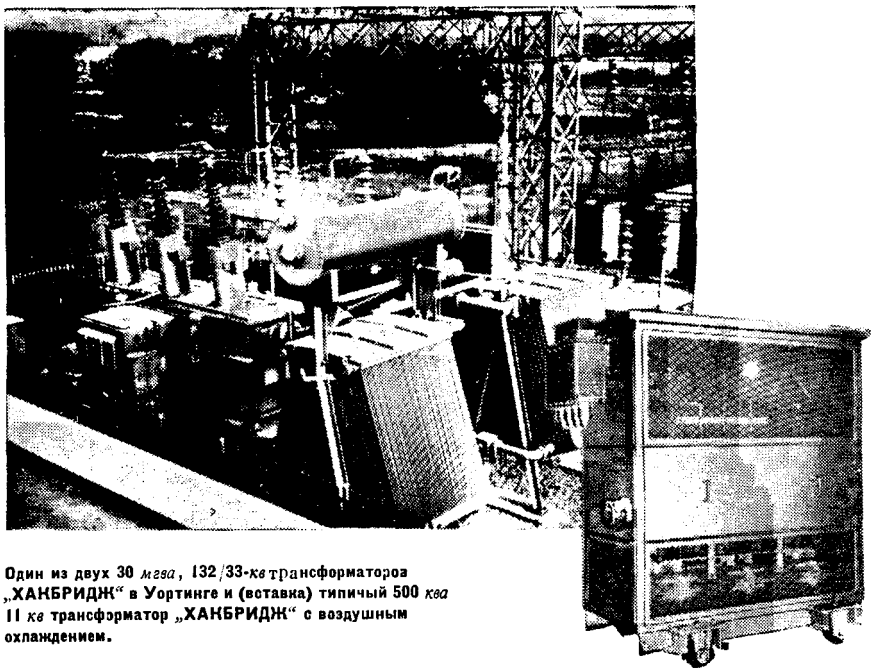
ТРАНСФОРМАТОРЫ для РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

ТРАНСФОРМАТОРЫ с ВОЗДУШНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

РЕАКТОРЫ

ДУГОГАСЯЩИЕ КАТУШКИ



Один из двух 30 *мва*, 132/33-*кв* трансформаторов „ХАКБРИДЖ" в Уортинге и (вставка) типичный 500 *ква* 11 *кв* трансформатор „ХАКБРИДЖ" с воздушным охлаждением.

ТРАНСФОРМАТОРЫ „ХАКБРИДЖ"

Общая мощность в установках по всему свету свыше 22 млн. *ква.*

ВЫПРЯМИТЕЛИ „ХЮВИТТИК"

Общая мощность в установках по всему свету свыше 1,5 млн. *квт.*

Для:

ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ
600, 1 500 и 3 000 *в*, постоянного тока

ТРАМВАЕВ и ТРОЛЛЕЙБУСОВ

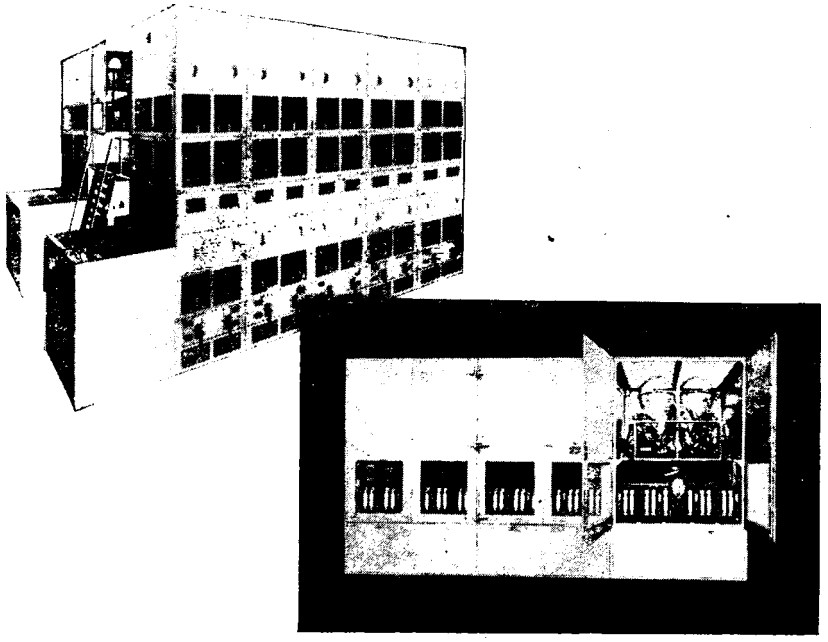
ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ и СИЛОВЫХ СЕТЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

МАШИН с ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПОСТОЯННОГО ТОКА
на сталелитейных заводах, газовых заводах, текстильных фабриках и пр.

ЭЛЕКТРОКАР и ЭЛЕКТРОВОЗОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ДЛЯ ЗАРЯДКИ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ



Часть установки из двух 60 000-*а*, 250/500-*в* выпрямителей „ХЮВИТТИК" для электролитических надобностей и (вставка) один из двух 1 500-*квт*, 3 000-*в* выпрямителей „ХЮВИТТИК" для железнодорожной тяги.

Находятся в эксплуатации в свыше 50 различных стран

HACKBRIDGE AND HEWITTIC ELECTRIC CO., LIMITED
WALTON-ON-THAMES - SURREY - АНГЛИЯ

Телефон: Walton-on-Thames 760 (8 линии) **Телеграммы и Кабели: "Electric, Walton-on-Thames"**

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Цена 8 руб. 32 р.

ПОДПИСЫВАЙТЕСЬ

на журналы на 1957 г.

„Электричество“

„Электрические станции“

с приложением —

„Энергохозяйство за рубежом“

„Гидротехническое строительство“

„Теплоэнергетика“

„Энергетик“

„Торфяная промышленность“

„Промышленная энергетика“

„Светотехника“

„Вестник электропромышленности“

Реферативный журнал — „Электротехника“

ПОДПИСКА ПРИНИМАЕТСЯ

городскими и районными отделами Союзпечати, во всех конторах, отделениях и агентствах связи и общественными уполномоченными по подписке на предприятиях, в учебных заведениях и учреждениях.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru