

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1948



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

4

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

ОРГАН АКАДЕМИИ НАУК СССР, МИНИСТЕРСТВА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ СССР
И МИНИСТЕРСТВА ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР

СОДЕРЖАНИЕ

Задачи дальнейшего внедрения высокочастотного электронагрева в промышленность	3
В. И. Калитвянский и В. М. Дегтев — Высокочастотный нагрев пластических масс	6
А. В. Нетушил и Б. А. Гольдблатт — Высокочастотная сушка и пропитка древесины	12
Д. Б. Мондрус, С. М. Маргелин и В. М. Зильберман — Унификация высокочастотных установок	18
П. Н. Горшков — Пути усовершенствования установочных проводов сильного тока	26
Л. А. Цейтлин — Параметры систем прямолинейных и криволинейных проводов	31
Р. Л. Агонов — Аппроксимирование кривой намагничивания	37
Авторефераты	
В. П. Никитин и Н. П. Куницкий — Динамическое равновесие магнитного состояния электрических машин в системе Леонарда	42
М. С. Михайлов-Микулинский — Новый механический тормоз для испытания двигателей	48
Л. М. Шницер — Тепловой процесс в сухом трансформаторе	51
М. Г. Герценштейн — Диэлектрические потери в пропитанной бумаге при малых градиентах	54
К. М. Поливанов и Б. И. Яхинсон — К расчету неустановившегося режима в цепных схемах	57
М. Л. Цуккерман — Мостовые схемы и матричные преобразования	60
Дискуссии	
К статье П. Н. Горшкова „Пути усовершенствования установочных проводов сильного тока“	65
К статье С. М. Сердинова „К проблеме энергоснабжения электрических железных дорог большой протяженности“	69
К статье Ю. В. Баймакова „Интенсифицированные электрические фильтры для пылеулавливания“	73
Обзоры и рефераты	77
Хроника	84
Письма и заметки	89
Библиография	
Г. И. Сканава — Книга В. Т. Ренне „Электрические конденсаторы“	92
Л. Б. Гейлер — Англо-русский политехнический словарь	93
Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике	94



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Доктор техн. наук, проф. **Г. Н. Петров** (редактор), академик **А. И. Берг**,
доктор техн. наук, проф. **Ю. В. Бутневич**, доктор техн. наук, проф. **А. А. Гла-**
зунов, член-корр. АН СССР **М. П. Костенко**, академик **В. Ф. Миткевич**,
канд. техн. наук **И. А. Сыромятников**, член-корр. АН СССР **М. А. Шателен**

Секретарь инж. **Я. А. Климовицкий**

Адрес редакции: Москва, Б. Черкасский пер., д. № 2, тел. К 4-24-80.
Адрес для корреспонденции: Москва, Главный почтамт, почтовый ящик № 648.
Адрес для телеграмм: Москва Электричество

Задачи дальнейшего внедрения высокочастотного электронагрева в промышленность

Всего три десятилетия отделяют нас от первых опытов промышленного применения индукционного способа нагрева металлов, связанных с электроплавкой в индукционных печах без стального сердечника. Следующим шагом в этой области явилось применение индукционного электронагрева в вакуумной промышленности для нагрева деталей радиоламп в процессе откачки воздуха из баллона лампы.

Однако основные способы промышленного применения высокочастотного нагрева, вызвавшие революцию в технологических процессах термообработки как металлов, так и диэлектриков и полупроводников, начали развиваться лишь 10—15 лет назад.

Некоторые особенности высокочастотного нагрева, как, например, возможность одновременного и равномерного прогрева всего объема изделия, возможность быстрого поверхностного нагрева металлического изделия, неодинаковый нагрев различных компонентов неоднородного материала в зависимости от их электрических характеристик, ускорение процесса нагрева и облегчение автоматизации технологического процесса — являются, в ряде случаев, решающими преимуществами высокочастотного нагрева по сравнению с другими способами термообработки и способствуют широкому проникновению высокочастотной техники в самые различные отрасли промышленности.

Советские ученые и инженеры явились пионерами в изучении и применении высокочастотного нагрева. Работы в области поверхностной закалки металлов токами высокой частоты были начаты в Советском Союзе более 15 лет назад.

Общепризнан приоритет Советского Союза в применении высокочастотного нагрева для сушки древесины. Работы в этой области были начаты в СССР в 1932 г.

Последнее десятилетие ознаменовалось особенно быстрым развитием высокочастотной техники и применением высокочастотного нагрева ко все большему числу технологических процессов, связанных с термообработкой.

Приведем примеры технологических процессов, успешно использующих высокочастотный нагрев.

Плавка металлов в индукционных печах широко применяется как для черных, так и для цветных металлов, в завод-

ских и в лабораторных условиях. Индукционные печи для плавки металлов по своим экономическим показателям вполне сравнимы с пламенными и электродуговыми печами, а по чистоте и точности технологического процесса обладают бесспорными преимуществами. Новейшие специальные магнитные сплавы магнито, альни, альсифер и др. были получены в индукционных печах с ламповыми генераторами.

Поверхностная закалка является той областью термообработки, в которой высокочастотный нагрев произвел коренную ломку технологического процесса и в которой особенно наглядно видны его преимущества. Высокочастотный нагрев при закалке позволяет быстро прогревать закаливаемую поверхность на минимально необходимую глубину и подвергать нагреву только те части изделия, износоустойчивость которых должна быть повышена. При поверхностной закалке сохраняется вязкость внутренней части изделия, что значительно повышает его прочность; нагревается лишь незначительная часть общего объема изделия, что резко сокращает количество затрачиваемой тепловой энергии, а поверхность изделия остается чистой, без окислы, что позволяет осуществлять закалку после окончательной шлифовки. Благодаря плодотворной работе советских ученых и инженеров высокочастотная поверхностная закалка в настоящее время уже широко внедрена в тракторную, станкостроительную и другие отрасли нашей промышленности. Необходимо отметить труды в этой области лауреата Сталинской премии В. П. Вологодина, Б. Н. Романова на станкозаводе им. Орджоникидзе, лауреатов Сталинской премии Г. И. Бабата и М. Г. Лозинского в лаборатории завода «Светлана» и С. Я. Турлыгина в Центральном бюро электрозакалки, а также труды работников станкостроительной промышленности, Московского автозавода им. Сталина, Горьковского автозавода им. Молотова, Уральского автозавода и других предприятий.

Нагрев металлов перед механической обработкой при помощи токов высокой частоты также приобретает все большее значение в промышленности. Применение такого нагрева заготовки непосредственно перед прокаткой прокатного станка позволило осуществить высококачественную прокатку мелких профилей из быстрорежущей стали. Этот процесс требует

чрезвычайно точного режима нагрева, обеспечивающего равномерную температуру как в поперечном сечении, так и по длине заготовки. Только, применяя высокочастотный нагрев, удалось полностью удовлетворить требования технологии. Высокочастотный нагрев улучшает и технологический процессковки: сокращается время нагрева заготовки, удлиняется срок службы кузнечного инструмента, вследствие отсутствия окалины на нагретой заготовке, улучшаются условия труда в кузнечных цехах. Из других применений токов высокой частоты для нагрева металлов следует упомянуть восстановление изношенных калибровых колец термосжатием и напайку пластинок твердого сплава на режущий инструмент.

В ряде случаев при помощи токов высокой частоты возможна термообработка сварных швов с целью улучшения структуры металла шва, а также сварка и лужение металлов.

Высокочастотная спайка (сварка) металла со стеклом имеет особенное значение в электровакуумной промышленности. Высокочастотный нагрев открывает ряд новых конструктивных возможностей в части герметического соединения металлов со стеклом, а также с другими неорганическими диэлектриками. В измерительных приборах можно приваривать герметически стеклянные крышки к корпусам, а в конденсаторах — делать герметические вводы. Высокочастотная сварка металла со стеклом дала возможность создать новые конструкции кенотронов, магнетронов, многосекционных рентгеновских трубок и высоковольтных вентилях.

Сушка древесины относится к области высокочастотного нагрева полупроводников. Применение высокочастотного нагрева для сушки древесины весьма ускоряет технологический процесс сушки за счет получения необходимых для быстрой сушки температурных перепадов, повышает качество материала за счет равномерного прогрева по всему объему и дает значительный экономический эффект. Применение токов высокой частоты сокращает срок сушки ценных пород древесины с нескольких лет до нескольких часов; при этом без специального оборудования производится пропитка дерева антисептиками или огнезащитными веществами. Высокочастотная сушка древесины в последние годы начинает широко внедряться в различные отрасли промышленности. Промышленное внедрение высокочастотной сушки и пропитки древесины стало возможно благодаря успешной многолетней работе в этой области сотрудников Центральной научно-исследовательской лаборатории электрификации промышленности и строительных работ (ЦНИЛЭПС) Министерства строительства предприятий тяжелой индустрии К. П. Семенского, В. Н. Попова, А. В. Нетушила, П. В. Гужева, Б. А. Гольдблатта, А. Н. Мазнина и др.

Высокочастотный нагрев пластических масс дает большие преимущества (работы Н. В. Александрова, В. И. Калитвянского и В. М. Дегтева в ВЭИ). В частности, термо-

обработка бакелитовых цилиндров высокочастотным нагревом по сравнению с обработкой в камерных печах обладает значительными преимуществами: в восемь раз сокращается время термообработки, значительно улучшаются электрические характеристики и однородность бакелита.

Вулканизация и термообработка резины токами высокой частоты также имеет большое значение. В этой области в СССР велись работы, начиная с тридцатых годов. В пищевой промышленности высокочастотный нагрев находит применение для стерилизации пищевых продуктов. Разработаны методы дезинсекции семян и кондиционирования пшеницы при помощи токов высокой частоты. Кроме того, высокочастотный нагрев с успехом применяется для склейки древесины, сушки табака, шерсти и др. продуктов, в керамической промышленности и многих прочих областях техники.

Изготовлением промышленных высокочастотных установок в настоящее время занимается завод «Электрик» Министерства электропромышленности, где Ю. Б. Вигдоровичем созданы новые конструкции генераторов. Проектирование и монтаж высокочастотных электротермических установок занимаются трест «Электротерм» Министерства электропромышленности (Д. И. Мондрус и др.) и лаборатория ЦНИЛЭПС (А. Н. Мазнин и А. Э. Попов).

Применение высокочастотного нагрева в самых разнообразных отраслях промышленности сопровождается ускорением технологических процессов, повышением производительности труда, качества продукции и экономичности производства.

Скорейшее развитие и совершенствование методов высокочастотного нагрева в промышленности является делом большой важности. Однако состояние выпуска высокочастотной аппаратуры предприятиями министерств электропромышленности и промышленности средств связи совершенно не удовлетворяет растущих потребностей страны. Продукция заводов как по количеству так и по номенклатуре не может еще обеспечить полное внедрение высокочастотной техники в наше народное хозяйство. Ощущается необходимость в расширении серийного производства как ламповых, так и машинных высокочастотных генераторов широкого диапазона мощности (от 10 до 600 kW) и частоты (от 2 kHz до 100 MHz).

Перед промышленностью стоит важная задача: в кратчайший срок развернуть производство электровакуумных приборов, конденсаторов, высокочастотных измерительных приборов и других аппаратов, необходимых для серийного выпуска высокочастотных генераторов.

Дальнейшее развитие высокочастотной техники выдвигает серьезные задачи и перед научно-исследовательскими организациями. Это, в первую очередь — изучение электрических и магнитных характеристик различных материалов в электромагнитном поле высокой частоты, повышение к. п. д. высокочастотных установок, автоматическое регулирование генераторов для поддержа-

ния заданного технологией режима при оптимальном к. п. д., дальнейшее совершенствование технологических процессов термообработки на базе современной высокочастотной техники.

В генераторах с электронными лампами, применяя методы радиолокационной техники (подача импульсов прямоугольной формы на сетку лампы и настройка контура на высшие гармоники), возможно повысить коэффициент полезного действия.

Приборы с разрядами в парах ртути позволяют преобразовывать постоянный ток или ток низкой частоты в ток повышенной частоты до 10 кГц с к. п. д. порядка 90 %. Необходим промышленный выпуск таких установок для плавления печей и подогрева под ковку.

Разработка ионных приборов с водородным наполнением, устойчивых в работе благодаря созданию водородных генераторов (устройств, поддерживающих требуемую плотность водорода в приборе независимо от поглощения или отдачи водорода электродами лампы), позволяет генерировать частоты до 100 МГц с высоким к. п. д.

Появление магнетронов — не только импульсных (мало пригодных для целей электронагрева), но также рассчитанных на длительную работу с мощностью порядка киловатта на сантиметровых волнах, делает реальным практическое применение нагрева полупроводников и диэлектриков в полых контурах при высоком к. п. д.

Министерство высшего образования должно проявить больше заботы о подготовке инженерных кадров в области высокочастотной электротермии. В связи с тем, что высокочастотные методы находят все большее применение, по видимому, настало время организовать в одном из ведущих электротехнических вузов страны кафедру промышленной высокочастотной электротехники.

В настоящем номере журнала «Электричество» помещен ряд статей, посвященных вопросам высокочастотного электронагрева. В статье **Д. Г. Мондруса**, **С. М. Марголина** и **В. М. Зильбермана** отражаются требования, предъявляемые к современным высокочастотным генераторам для электротермии, и ставится вопрос о выпуске единой серии высокочастотных генераторов. В статье **В. И. Калитвянского** и **В. М. Дегтева** описываются высокочастотные генераторы и их применение для нагрева пластических масс. В статье **А. В. Нетушила** и **Б. А. Гольдблатта** дается описание способа сушки и пропитки древесины и промышленных установок для этой цели.

Быстрое внедрение в промышленность новой техники высокочастотного электронагрева на базе развитого производства соответствующей аппаратуры должно способствовать выполнению послевоенной сталинской пятилетки в четыре года.



Высокочастотный нагрев пластических масс

Кандидат техн. наук В. И. КАЛИТВЯНСКИЙ и инж. В. М. ДЕГТЕВ

Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина

Известно, что при воздействии на диэлектрики переменного электрического поля в них возникают потери электрической энергии. Тепло диэлектрических потерь может быть с успехом использовано для технологического нагрева диэлектриков.

В 1930—1933 гг. в СССР и за границей были начаты работы по применению высокочастотных электрических полей в различных отраслях промышленности. На основании этих работ были предложены промышленные методы высокочастотной сушки различных неметаллических материалов. Однако, только бурное развитие вакуумной и радиотехнической промышленности последних лет и создание производства мощных высокочастотных генераторов создали все предпосылки для разрешения задач промышленного использования высокочастотного нагрева диэлектриков.

Нагрев и сушка материалов, имеющих малую теплопроводность, были всегда медленными, трудно управляемыми процессами, требующими громоздких установок, и к тому же плохо поддавались автоматизации. При обычных методах нагрева тепло подводится к нагреваемым объектам извне, что связано с необходимостью иметь большие температурные градиенты, а это приводит к неравномерности нагрева. Кроме того, неизбежна значительная затрата времени для переноса тепла внутрь материала. При высокочастотном нагреве диэлектриков тепло генерируется в самих нагреваемых материалах, поэтому при высокочастотном нагреве теплопроводность материала и окружающей среды не имеет значения. Это позволяет быстро и равномерно нагревать большие объемы материалов с плохой теплопроводностью.

Применение высокой частоты для предварительного нагрева пластических масс. При прессовке деталей из термореактивных пластических масс прессовочная масса загружается в нагретые до 130—160°C стальные прессформы, где подвергается прессовке при удельных давлениях 200—400 кг/см² с соответствующей выдержкой. В результате нагрева прессуемый материал стано-

Приведены результаты работ авторов по высокочастотному нагреву в технологии различных пластических масс. Показаны значительные преимущества этого нагрева. Описана промышленная установка для подогрева таблеток из термореактивных прессовочных масс. Статья представляет собой сокращенное изложение докладов авторов на XXX пленуме Всесоюзного бюро электрической изоляции в сентябре 1946 г.

вится пластичным и под воздействием давления принимает необходимую форму. Далее следуют полимеризационные и конденсационные процессы, приводящие к отверждению изделия. Таким образом, для получения

изделия из термореактивной пластмассы необходимо нагреть прессуемый материал до рабочей температуры и поддерживать эту температуру в течение всего цикла прессовки.

Плохая теплопроводность прессовочных масс удлиняет время их нагрева, что увеличивает длительность прессовки деталей из пластмасс. Кроме того, нагрев массы в прессформе происходит неравномерно, в результате чего наблюдается частичное отверждение массы в наиболее нагретых (наружных) слоях, в то время как в средней части масса еще не успевает нагреться до температуры, при которой она становится пластичной. Недостаточная пластичность неравномерно нагретой массы приводит к необходимости применять высокие удельные давления, что требует наличия мощных гидравлических прессов; кроме того, приходится изготавливать прессформы из высококачественных легированных сталей.

Неравномерность нагрева прессуемой массы в прессформе приводит также к неоднородностям в материале и наличию внутренних напряжений, которые вызывают деформацию деталей после их извлечения из прессформы.

Предварительный подогрев таблеток из прессовочных масс до 80—100°C в термостатах хотя и дает возможность несколько (на 15—20%) сократить время выдержки в прессформе, не решает вопроса до конца, так как нагрев в термостате требует длительного времени (до 30 min), причем неизбежна частичная полимеризация связующего на поверхности таблеток, что связано с ухудшением пластичности.

Как показали работы, проведенные авторами во Всесоюзном электротехническом институте им. Ленина, применение высокой частоты для быстрого нагрева прессуемой массы до рабочих температур дает большой технико-экономический эффект.

При этом методе таблетки помещаются в электрическое поле высокой частоты и тепло диэлектрических потерь быстро и равномерно нагревает материал до температуры 120—140°C, после чего таблетки быстро переносятся в горячую прессформу, где и производится прессование. Так как нагретая до этой температуры масса пластична, то для придания ей требуемой формы не нужно применения тех высоких давлений, которые необходимы при обычных методах прессовки. Кроме того, при предварительном нагреве прессуемой массы до рабочей температуры значительно сокращается время прессовки, так как при этом отпадает необходимость нагревать материал в прессформе. Возможно получить изделия весьма сложной формы, однородные по всему объему.

Для эффективного использования высокой частоты при предварительном нагреве пластических масс необходимо правильное разрешение следующих основных задач: 1) выбор рабочей частоты; 2) выбор напряженности электрического поля; 3) установление температуры предварительного нагрева; 4) установление скорости нагрева; 5) выбор мощности генератора; 6) выбор схемы высокочастотного генератора и его основных параметров; 7) обеспечение полной автоматичности работы установки, чтобы обслуживание установки могло производиться малоквалифицированным персоналом; 8) простое и дешевое конструктивное оформление установки и небольшие габариты ее; 9) удобство работы и особенно загрузки подогреваемых таблеток; 10) высокий к. п. д. установки; 11) безопасность работы; 12) отсутствие радиопомех.

Величина диэлектрических потерь при данном напряжении примерно пропорциональна частоте электрического поля, так как $\operatorname{tg} \delta$ прессовочных масс в пределах 10 ÷ 50 МГц сравнительно мало меняется с частотой. Однако, применять частоту выше 40 ÷ 50 МГц не следует, так как при более высоких частотах снижается к. п. д. генератора и возникает ряд дополнительных трудностей (стоячие волны на рабочих электродах, усложнение настройки генератора и др.). На основе проведенных работ для подогрева пластических масс обычного типа (на фенольных, крезольных и карбамидных смолах) мы выбрали рабочую частоту 20 МГц.

Величина диэлектрических потерь пропорциональна квадрату приложенного к диэлектрику напряжения. Практически напряжение ограничивается длительной пробивной прочностью диэлектрика на высокой частоте. Как показали наши исследования, при частоте 20 МГц увеличение напряженности электрического поля выше 2 ÷ 2,5 кВ/см для таблеток из обычных прессовочных порошков, содержащих влагу и выделяющих при нагреве газы, недопустимо, так как при этом возникает опасность перекрытия и пробоя нагреваемых таблеток. Исходя из вышеизложенного, нами установлена для нагрева таблеток напряженность электрического поля 0,5 ÷ 1,5 кВ/см.

При установлении температур, до которых следует производить предварительный нагрев масс, мы руководствовались следующими соображениями: 1) температура должна быть близкой к рабочей температуре прессования; 2) температура нагрева прессовочной массы не должна превосходить критической температуры, при которой происходит быстрая полимеризация связующего. Если таблетку нагреть выше критической температуры, то во время переноса нагретой таблетки в прессформу произойдут отвердевание связующей смолы и потеря пластичности.

Зависимость между температурой предварительного нагрева t и временем передачи нагретой таблетки от генератора к прессформам T выражена уравнением:

$$t = a + b \cdot \lg T, \quad (1)$$

где a и b — постоянные, зависящие от химического состава массы, температуры окружающего воздуха и других факторов.

Время T , если генератор расположен рядом с прессом, составляет 10 ÷ 15 sec. В этих условиях обычные пресспорошки не следует нагревать выше 120 ÷ 130°C. Скорость нагрева таблеток ограничивается характеристикой и мощностью высокочастотного генератора; при очень больших скоростях нагрева требуются большие мощности. С другой стороны, при малых скоростях нагрева возможна частичная полимеризация связующего. Как показали наши исследования, время подогрева таблеток обычных прессовочных масс должно быть в пределах 15 ÷ 60 sec.

В процессе нагрева таблеток термореактивной массы в поле высокочастотного конденсатора, связанного с колебательным контуром генератора, $\operatorname{tg} \delta$ и ϵ материала будут изменяться, что приведет к изменению режима генератора. При некоторых условиях это может недопустимо увеличить мощность рассеяния на аноде ламп и даже вызвать срыв самовозбуждения. Поэтому при выборе режима и основных параметров генератора необходимо учитывать изменения диэлектрических свойств материала при нагреве.

На основе предварительных работ по изучению процессов нагрева диэлектриков нами построена лабораторная высокочастотная установка. Выпрямительная часть установки осуществлена по однофазной мостовой схеме, собранной на газотронах ВГ-236, а генераторная часть — по схеме с самовозбуждением на двух параллельно соединенных генераторных лампах ГК-3 000. Колебательный контур рассчитан на рабочую частоту 20 МГц. Связь рабочего конденсатора, в котором создается электрическое поле, воздействующее на нагреваемую массу, с анодным колебательным контуром — автотрансформаторная. При расчете установки общее начальное сопротивление анодной нагрузки было установлено несколько завышенным, так как в процессе нагрева оно несколько падает из-за изменения диэлектрических свойств материала.

Подготовка выпрямителя к работе, включение и выключение генератора, включение вы-

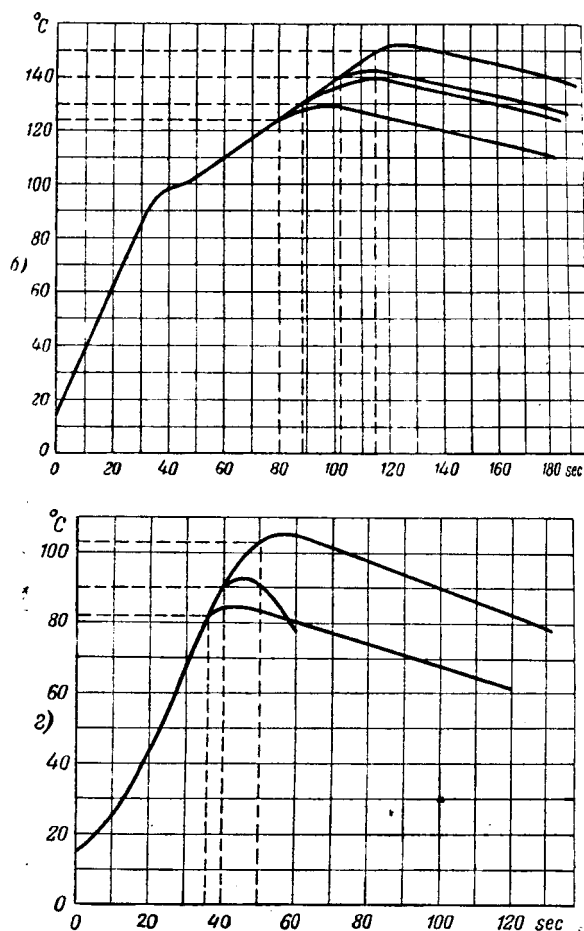
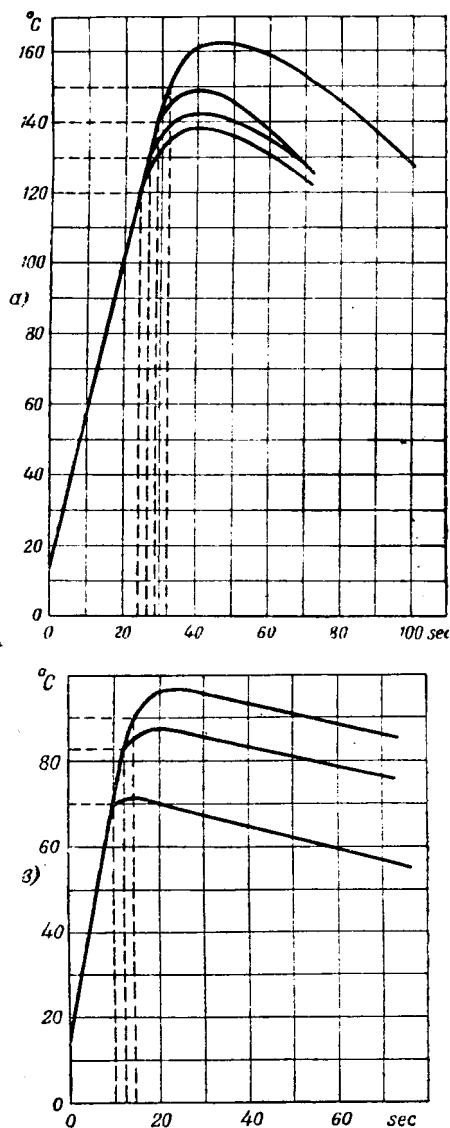


Рис. 1. Зависимость температуры от времени для подогрева прессовочных порошков. Пунктирные линии соответствуют моменту выключения генератора.
а — порошок К-21-22; б — порошок К-18-2; в — порошок К-18-2 АФ; г — порошок К-17-2.

держки нагрева в разработанной установке осуществляются автоматически, позволяя легко управлять работой высокочастотного генератора во время нагрева прессовочных масс. Генератор с выпрямителями и со всеми вспомогательными устройствами собран в шкафу размерами $1650 \times 750 \times 650$ мм³.

На этой установке были определены оптимальные режимы нагрева таблеток из наиболее широко применяемых в СССР прессовочных порошков. Для этого были взяты производственные партии порошков марок: К-17-2; К-18-2; К-18-2 АФ; К-21-22, выпускаемые заводом «Карболит», а также аминопласт завода МЭЗ.

Порошки таблетировались обычным способом; в боковой части таблетки высверливалось небольшое отверстие, в которое вводился термометр или специальный жидкостный термометр. Испытуемые таблетки перед проведением опытных нагревов выдерживались 10 суток в помещении с нормальной влажностью и температурой. Все испытанные порошки при их помещении в электрическое высокочастотное поле легко на-

гревались до температуры $130 \div 150^\circ\text{C}$ и выше. При достижении температуры $100 \div 105^\circ\text{C}$ наблюдается интенсивное выделение паров воды и газа. При длительном ($2,5 \div 3$ min) нагреве температура возрастает до $250 \div 270^\circ\text{C}$ и наблюдается интенсивное обугливание.

Изменения режима работы генератора в течение всего цикла нагрева таблеток, благодаря значительному запасу мощности высокочастотного генератора, мы почти не наблюдали. Для установления оптимальных режимов нагрева снималась зависимость температуры от времени нахождения таблетки в высокочастотном поле, создаваемом рабочими электродами установки. Результаты приведены в виде кривых рис. 1. Скорость нагрева у разных прессовочных порошков различна; у всех порошков после отключения высокочастотного генератора за счет происходящей в смоле экзотермической реакции наблюдается дополнительное повышение температуры, которое в некоторых случаях достигает 20°C . Это обстоятельство следует учитывать при установлении режима нагрева таблеток.

При подогреве аминопласта наблюдается быстрое повышение температуры: за 45 sec температура таблетки поднимается до $95 \div 105^\circ\text{C}$.

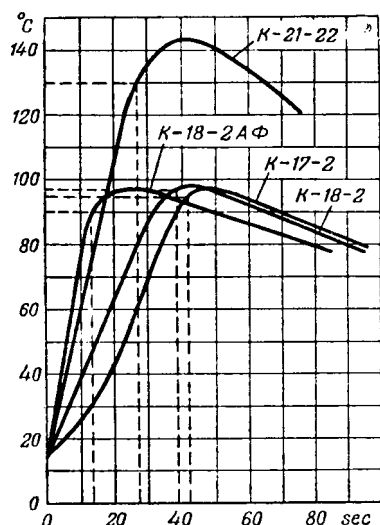


Рис. 2. Оптимальные режимы подогрева прессовочных порошков.

и масса приобретает достаточно хорошую пластичность. Термопластики на основе полихлорвинила легко доводятся до хорошей пластичности всего за 10—15 sec.

На основе экспериментальных данных с учетом степени пластичности разных типов порошков при различных температурах мы установили оптимальные режимы нагрева основных типов пресспорошков в высокочастотном поле. На рис. 2 приведены такие режимы нагрева порошков K-18-2, K-21-22, K-18-2 АФ и K-17-2.

Для проверки высокочастотного предварительного нагрева пластических масс в производственных условиях установка была помещена в цехе опытного завода ВЭИ, непосредственно у пресса, и производилась сравнительная прессовка различных деталей обычным способом и с применением высокочастотного нагрева. Для примера приводим данные, полученные при прессовке корпуса штепсельной вилки из пресспорошка K-18-2 АФ. Время выдержки при прессовке обычным способом около 5 min (с момента окончания подъема давления). При предварительном нагреве таблетка прогревалась в поле высокой частоты в течение 15—20 sec, после чего быстро переносилась в нагретую прессформу. При этом время выдержки изделия в прессформе сокращалось до 30—45 sec без ухудшения качества. Следовательно, время выдержки изделия в прессформе уменьшилось примерно в 10 раз. Для деталей с более толстыми стенками получаемый при высокочастотном нагреве таблеток выигрыш еще больше. Значения времени выдержки изделий различной толщины из термореактивных пластмасс при высокочастотном и термостатном подогреве и без подогрева приведены на рис. 3. Видно, что эффективность высокочастотного подогрева таблеток повышается с повышением толщины изделия. При высокочастотном нагреве возможна прессовка деталей из термореактивных пластмасс практически любой толщины без значительного увеличения времени прессовки. Это открывает

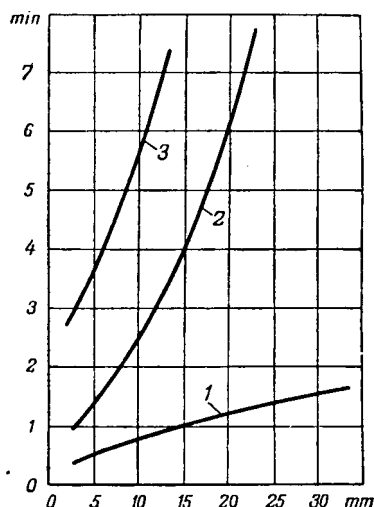


Рис. 3. Зависимость времени выдержки в прессформе от толщины изделия для разных методов прессовки пластмасс. 1 — с высокочастотным подогревом; 2 — с термостатным подогревом до 100° C; 3 — без подогрева.

большие возможности в конструировании деталей из пластических масс, имеющих толстые стенки или же стенки резко различающейся толщины, а также деталей с большим количеством металлических вставок и т. п.

На основе изучения предварительного нагрева при прессовке пластических масс разных типов и условий работы генератора на такую нагрузку нами была разработана конструкция промышленного генератора для подогрева таблеток. Схема этого генератора выбрана с расчетом отдачи максимальной мощности в течение всего цикла нагрева при изменяющихся диэлектрических свойствах нагреваемого материала. Схема позволяет осуществить электрическое саморегулирование в определенных пределах напряжения на обкладках рабочего конденсатора, чтобы напряжение на двух точках связи с основным контуром оставалось постоянным в течение всего цикла. Таким образом, мощность, отдаваемая генератором нагреваемому материалу, остается постоянной во всем процессе нагрева, что позволяет построить генератор со значительно более высоким к. п. д. по сравнению с обычными схемами.

Общая схема промышленной установки показана на рис. 4. Генератор собран на двух лампах ГК-3 000, работающих в параллель. Выпрямитель собран по однофазной мостовой схеме на газотронах ВГ-237 с повышенным напряжением обратного зажигания. Установка имеет контрольно-измерительную аппаратуру, автоблокировку, автоматическую подготовку выпрямителя к работе, автоматическую выдержку времени и сигнальные устройства. Генератор собран в металлическом шкафу размером 850×800×1700 mm³; вся контрольно-измерительная аппаратура, сигнальные лампочки и кнопки управления вынесены на переднюю панель шкафа. Рабочая камера с электродами конденсатора осуществлена в виде особого выдвигающегося «лотка», помещенного в передней стенке шкафа. Таблетки помещаются

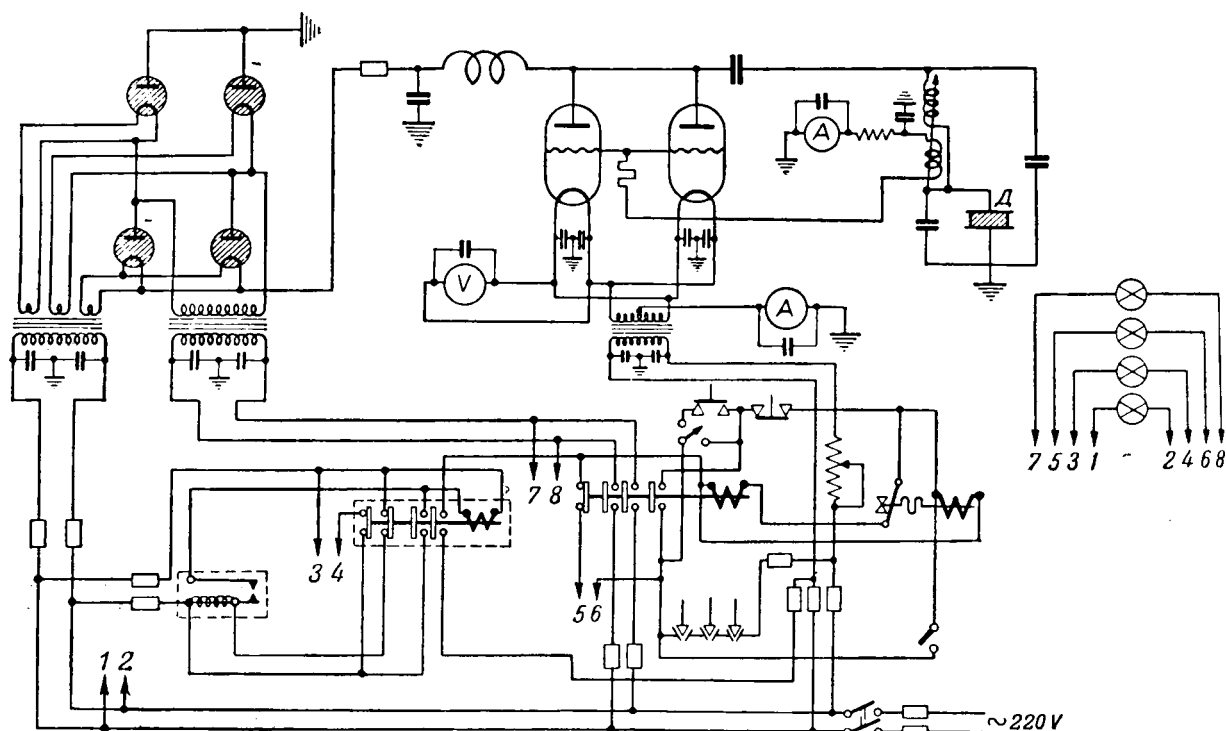


Рис. 4. Схема промышленной установки для высокочастотного нагрева пластических масс.
Д — нагреваемый диэлектрик.

на нижний (заземленный) электрод лотка, после чего лоток вдвигается в камеру, замыкая при этом контакты блокировки. При ручном управлении генератор включается и выключается кнопками, при автоматическом — специальным реле времени.

Внешний вид генератора показан на рис. 5. При анодном питании генератора напряжением в 9 kV полезная мощность установки достигает 5 kW при частоте 20 MHz, что позволяет нагревать до температуры формования таблетки из типовых пресспорошков весом $1,5 \div 2$ kg в течение $3 \div 5$ min.

Применение высокой частоты при прессовке слоистых пластических масс. Решение проблемы быстрого и равномерного нагрева слоистых диэлектриков (гетинакс, текстолит и др.), требующих в процессе их изготовления длительной прессовки при повышенной температуре, является одним из важнейших условий повышения качества и интенсификации производства.

При нагреве заготовок пропитанной бумаги или ткани между плитами пресса, нагреваемыми паром или электронагревателями, происходит постепенное повышение температуры от поверхностных слоев к середине заготовки. Скорость нагрева зависит как от температуропроводности самого материала, так и от градиента температуры.

Интенсификация процесса нагрева материала путем повышения температуры плит вызвала бы еще большую неравномерность нагрева по толщине материала. Кроме того, при очень высокой температуре плит неизбежно интенсивное тепловое старение и даже обугливание наружных слоев материала.



Рис. 5. Общий вид высокочастотного генератора для подгрева пластических масс.

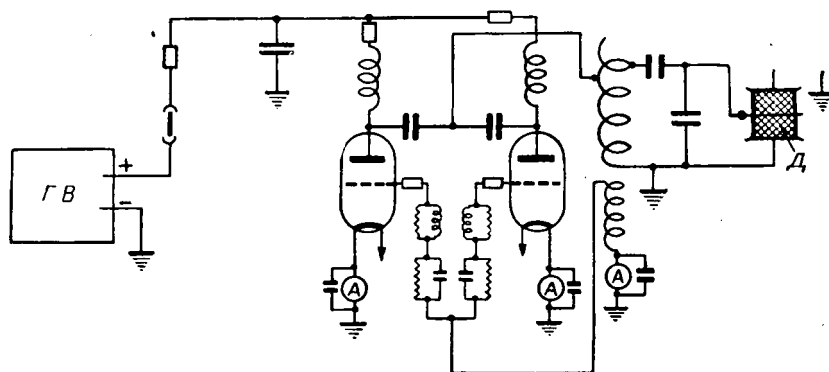


Рис. 6. Схема высокочастотного генератора для нагрева слоистых материалов при прессовке.

ГВ — газотронный выпрямитель; Д — нагреваемый диэлектрик.

Полное решение проблемы нагрева слоистых диэлектриков при их прессовке дает применение высокой частоты. Как показали работы, проведенные в Изоляционной лаборатории, исходные материалы, применяемые в производстве гетинакса и текстолита, в начальной стадии процесса нагрева имеют большой коэффициент диэлектрических потерь, что позволяет быстро и равномерно нагреть их до рабочей температуры прессования.

Так как выделение тепла происходит внутри диэлектрика, то распределение температуры по толщине последнего будет практически равномерным, особенно при дополнительном нагреве электродов.

Быстрое и равномерное повышение температуры по всей массе прессуемого материала позволяет значительно сократить общее время прессования и получить высококачественные материалы практически любой толщины.

Предварительными работами, проведенными в Изоляционной лаборатории [Л. 2], установлено, что при высокочастотном нагреве слоистых диэлектриков на основе фенольноформальдегидных смол нагрев прессуемого материала следует производить до температуры порядка 160—170°С; время нагрева не зависит от толщины прессуемого материала и составляет 10—40 мин; оптимальное давление при прессовке составляет 40—50 кг/см²; рабочая частота 1,5—2 МГц вполне достаточна для быстрого и равномерного разогрева до рабочей температуры; напряженность электрического поля должна быть не более 0,2—2 кВ/см. При нагреве бакелизированной бумаги или ткани происходит изменение $\tan \delta$ и ϵ материала, что приводит к изменению режима высокочастотного генератора; для обеспечения устойчивой работы высокочастотного генератора необходимо регулировать рабочий контур генератора или же иметь саморегулирующийся контур. Гетинакс, при прессовке которого применяется высокочастотный нагрев, имеет высокие диэлектрические свойства.

Для разработки технологических режимов прессовки слоистых материалов в опытном изо-

ляционном цехе ВЭИ был построен специальный высокочастотный генератор мощностью в 60 кВт, позволяющий проводить запрессовки в полупромышленном масштабе. Принципиальная схема его показана на рис. 6.

Выводы. Проведенные во Всесоюзном электротехническом институте им. Ленина работы по применению высокочастотного нагрева прессовочных порошков и слоистых диэлектриков дали следующие результаты.

1. Процессы прессования термореактивных прессовочных порошков могут быть интенсифицированы при применении высокочастотного подогрева таблеток, при одновременном повышении качества и снижении брака.

2. При применении высокочастотного подогрева таблеток может быть значительно расширена номенклатура деталей из пластмасс (детали с очень толстыми стенками, детали с большим количеством металлических вставок и др.).

3. Применение высокочастотного подогрева таблеток позволяет увеличить производительность прессов за счет снижения удельного давления.

4. Разработанный и изготовленный в ВЭИ высокочастотный генератор промышленного типа мощностью до 5—6 кВт при частоте 20 МГц дает возможность производить быстрый и равномерный нагрев таблеток из термореактивных прессовочных порошков до рабочих температур прессования.

5. Применение высокочастотного нагрева при прессовке слоистых диэлектриков типа гетинакса и текстолита позволяет интенсифицировать процесс нагрева заготовок при прессовке.

Литература

1. В. И. Калитивянский и В. М. Дегтев. Высокочастотный нагрев неметаллических материалов. Изд. ЦБТИ Министерства электропромышленности СССР, 1946.
2. Н. В. Александров и В. М. Дегтев. Высокочастотный нагрев слоистых диэлектриков при прессовании. ВЭП, № 6, стр. 4—8, 1945.



Высокочастотная сушка и пропитка древесины

Кандидат техн. наук А. В. НЕТУШИЛ и инж. Б. А. ГОЛЬДБЛАТТ

Центральная научно-исследовательская лаборатория электрификации промышленности и строительных работ

Качественная сушка древесины — продолжительный и сложный процесс. Естественная сушка ценных пород и больших сортиментов древесины продолжается до нескольких лет и все-таки не обеспечивает достаточно малой конечной влажности. Сушка древесины внешним нагревом также сопряжена с большими сроками, достигающими нескольких месяцев, и далеко не всегда дает необходимое качество продукции. Это естественно, так как в обоих случаях движение влаги из внутренних слоев древесины к периферии под влиянием градиента влажности между внешними и внутренними слоями происходит чрезвычайно медленно.

Применение электрического тока высокой частоты, проходящего непосредственно через древесину, создает более благоприятные условия нагрева. Внутренние слои древесины нагреваются более, чем наружные и, благодаря градиенту температуры, содействующему движению влаги, сушка происходит значительно быстрее.

Первые опыты по скоростной сушке древесины в поле токов высокой частоты были произведены в СССР в 1930—1934 гг. [Л. 1—4].

Как первые опыты в СССР, так и последующие иностранные работы проводились при частотах коротковолнового диапазона $5 \div 60$ МГц (длина волны $\lambda = 60 \div 5$ м). Этот диапазон частот позволяет сушить заготовки малого габарита, не превышающие по длине несколько десятков сантиметров. С увеличением размера заготовки начинает сказываться неравномерность нагрева, вызванная стоячими волнами в материале, а также неоднородностью структуры и первоначальной влажности древесины¹. В сочетании

Рассматривается вопрос о целесообразности сушки древесины токами высокой частоты. Приводятся опытные зависимости и формулы для расчета потерь в древесине с учетом анизотропии ее строения. Описывается разработанный ЦНИЛЭПС для сушки дерева высокочастотный генератор 50 кВт. Статья представляет собой сокращенное изложение докладов авторов на совещаниях Всесоюзного Бюро электрической изоляции в 1947 г.

с относительно низким к. п. д. коротковолновых генераторов это привело к тому, что область применения сушки древесины в поле токов высокой частоты коротковолнового диапазона ограничилась малогабаритными образ-

цами, преимущественно из березы, имеющей наиболее однородную структуру [Л. 5, 6].

Попутно с сушкой токами коротковолнового диапазона в СССР велись опыты по применению частот средневолнового диапазона. В этом направлении наилучшие результаты были получены Центральной научно-исследовательской лабораторией электрификации промышленности и строительных работ (ЦНИЛЭПС) Министерства строительства предприятий тяжелой индустрии СССР, которая за счет некоторого повышения сроков добила равномерной сушки при относительно малом расходе электрической энергии. Если при сушке древесины токами коротковолнового диапазона [Л. 6] расход электроэнергии на 1 кг удаленной влаги превышал 3 кВт·ч, то при частотах средневолнового диапазона правильной технологией сушки добиваются расхода энергии в 1,5 кВт·ч на 1 кг удаленной влаги, причем последняя цифра еще не является пределом.

На основании данных ЦНИЛЭПС рядом министерств было принято решение о широком внедрении высокочастотной сушки древесины.

В настоящее время в нашей стране количество сданных в эксплуатацию установок средневолнового диапазона (частоты от 0,25 до 0,5 МГц), выполненных на основании материалов ЦНИЛЭПС, измеряется десятками. Размеры леса, поступающего в сушку, достигают 11 м в длину и 300×300 мм² в сечении, в то время как в иностранной печати не встречалось описания сушки образцов древесины, превышающих по длине несколько сотен миллиметров.

Применение высокочастотной сушки на строительстве Беломорско-Балтийского канала им. Сталина позволило произвести заготовку строительного леса в рекордно короткие сроки [Л. 7, 8].

¹ Для получения равномерного нагрева необходимо, чтобы размер заготовки не превышал одной десятой доли волны в материале. При больших значениях влажности ε достигает $50 \div 70$ и, следовательно, диапазону волн $\lambda_0 = 5 \div 60$ м в вакууме соответствуют длины волн в древесине $\lambda = 0,6 \div 8$ м. Таким образом, габариты образцов не должны превышать $60 \div 800$ мм.

Высокочастотная сушка позволяет без специального вспомогательного оборудования производить пропитку древесины антисептиком путем погружения разогретой токами высокой частоты древесины в антисептик. Быстрая конденсация паров в охлаждающейся древесине приводит к образованию вакуума во внутренних слоях древесины и впитыванию антисептика в ее поры.

Электрические параметры древесины. При внесении древесины в электрическое поле высокой частоты через древесину протекает ток, плотность которого \vec{j} зависит от напряженности электрического поля \vec{E} , установившегося в древесине, и физических констант древесины. Эта зависимость согласно закону Ома для переменного тока может быть представлена следующим образом:

$$\vec{j} = \bar{\sigma} \vec{E}, \quad (1)$$

где $\bar{\sigma}$ — представляет собой комплексную удельную проводимость древесины, которая зависит как от частоты тока, температуры и влажности древесины, так и от направления электрического поля.

Древесина имеет сложную анизотропную структуру, и ее свойства в различных направлениях различны. Если пренебречь неоднородностями, вызванными сучками и т. п., то древесину можно рассматривать как среду, обладающую аксиальной симметрией. Каждая точка материала характеризуется тремя значениями удельной проводимости соответствующими направлениям: вдоль волокна, радиально, тангенциально. В цилиндрических координатах этим трем ортогональным направлениям соответствуют единичные орты z^0 , r^0 и ρ^0 (рис. 1).

В таком случае удельная проводимость древесины представляет собой тензор второго ранга [Л. 10] и в цилиндрической системе координат записывается следующим образом:

$$\bar{\sigma} = \begin{vmatrix} \sigma_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{nn} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz} \end{vmatrix} \quad (2)$$

Полагая, что комплекс

$$\bar{\sigma} = \bar{\gamma} + j\bar{\beta}, \quad (3)$$

где $\bar{\gamma}$ и $\bar{\beta}$ — тензоры, составленные из вещественных элементов, можно записать:

$$\bar{\gamma} = \begin{vmatrix} \gamma_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_{nn} & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_{zz} \end{vmatrix} \quad \text{и} \quad \bar{\beta} = \begin{vmatrix} \beta_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & \beta_{nn} & 0 \\ 0 & 0 & \beta_{zz} \end{vmatrix} \quad (4)$$

При переходе к иной системе координат выражения для $\bar{\sigma}$ усложняются, и элементы с разными индексами уже не обращаются в нули.

Как показали работы А. Б. Шистер, значения элементов диагонали тензора удельной проводимости

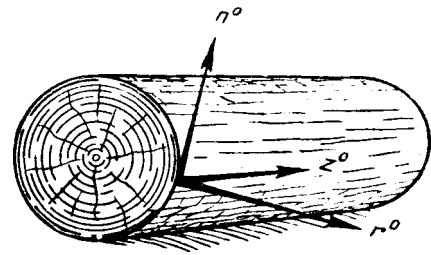


Рис. 1. Расположение осей анизотропии древесины. z^0 — направление вдоль волокон; r^0 — радиальное направление; ρ^0 — тангенциальное направление.

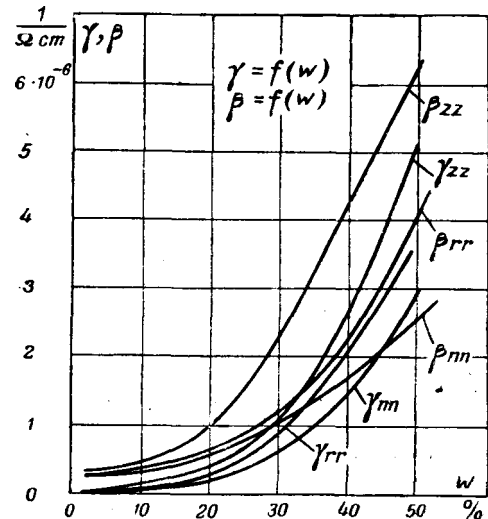


Рис. 2. Зависимость удельной активной γ и реактивной β проводимости сосны от влажности w в направлении трех осей анизотропии при температуре $\vartheta = 15^\circ\text{C}$ и частоте 250 kHz.

мости (рис. 2) резко различны. Так, например, сосна обладает наибольшей проводимостью вдоль волокна, а наименьшей — в тангенциальном направлении, что объясняется наличием капилляров вдоль оси z и радиальных лучей в направлении r . С увеличением температуры это различие возрастает.

При практических расчетах сопротивления штабеля уложенной древесины приходится пользоваться некоторыми средними значениями удельной проводимости для направлений перпендикулярных оси z и заменять тензор $\bar{\sigma}$ некоторой усредненной скалярной величиной $\sigma = \gamma + j\beta$.

При расчете диэлектрических потерь обычно выражают удельную проводимость материала через ϵ и $\text{tg } \delta$, причем $\text{tg } \delta$ оказывается значительно меньше единицы и обычно мало зависит от частоты. В таком случае между принятыми выше обозначениями γ и β , с одной стороны, и ϵ и $\text{tg } \delta$ с другой существует зависимость:

$$\gamma = \gamma(0) + \omega \epsilon \epsilon_0 \text{tg } \delta; \quad \beta = \omega \epsilon \epsilon_0, \quad (5)$$

где $\gamma(0)$ — значение удельной проводимости при постоянном токе (ввиду ее малости ею часто пренебрегают).

При расчете нагрева полупроводников, примером которых является древесина, оба приве-

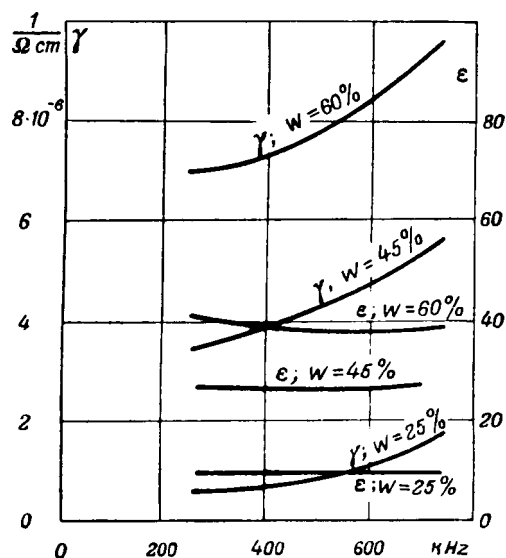


Рис. 3. Зависимость средней удельной активной проводимости γ и диэлектрической проницаемости березы от частоты при температуре $\theta = 15 \div 17^\circ\text{C}$ при различных значениях влажности w .

денные выше допущения неприменимы. Значение $\text{tg } \delta$ часто достигает единицы, а величина $\gamma(0)$ намного превышает значение второго слагаемого в формуле (5).

В этом случае более целесообразно измерять непосредственно γ в функции частоты температуры и влажности, а не пользоваться вспомогательными величинами. Если известна напряженность поля E , то удельные потери в древесине могут быть определены как

$$P_0 = \gamma E^2. \quad (6)$$

При измерении величин γ и β большое значение имеет воздушный промежуток между электродом и образцом древесины. Неучет этого воздушного промежутка часто приводит к получению заниженных значений ϵ и $\text{tg } \delta$. Повидимому, этим следует объяснить малые $\text{tg } \delta$ и ϵ влажной древесины, приведенные Тэйлором [Л. 9]. Для ели с влажностью 60% Тэйлор получил $\epsilon_r = 4$, что при ϵ_r воды = 80 едва ли возможно. Это относится и к первоначальным экспериментам ЦНИЛЭПС, на основании которых была запроектирована одна из промышленных установок на Беломорско-Балтийском канале; воздушные зазоры в малых измеряемых образцах привели к тому, что при пуске установки для получения расчетных условий работы генератора между электродом и древесиной пришлось ввести значительный зазор [Л. 8].

Исследовательские работы А. Б. Шистер, проведенные при пластичных электродах, плотно прижатых к поверхности древесины, показали, что для влажности порядка 80—100% диэлектрическая проницаемость древесины лиственных пород может достигать величин близких к 80, а хвойных—к 40—50; эффективный угол потерь может превышать 45° .

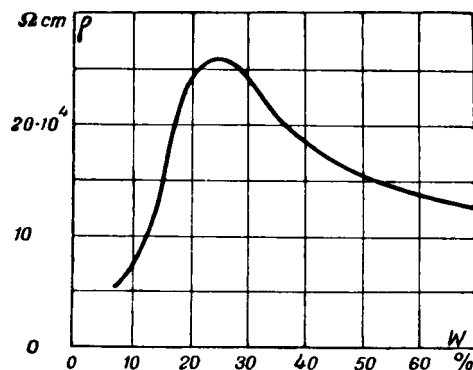


Рис. 4. Зависимость среднего активного сопротивления березы ρ от влажности w при температуре $\theta = 15 \div 17^\circ\text{C}$ и частоте $f = 250 \text{ kHz}$.

В применяемом диапазоне частот ϵ практически не зависит от частоты, а γ изменяется в сравнительно небольших пределах, особенно при больших влажностях (рис. 3).

В расчете общего сопротивления штабеля уложенной древесины необходимо учитывать переходное сопротивление между электродной сеткой и древесиной.

При работе высокочастотного генератора напряженность электрического поля в материале не поддается точному учету, в то время как общий ток, протекающий через древесину, и, следовательно, средняя плотность тока могут быть легко определены. В этом случае для расчета потерь необходимо знать параметры древесины, характеризующие зависимость потерь от плотности тока.

Если обозначить²

$$\frac{1}{\sigma} = \zeta = \rho - j\xi, \quad (7)$$

то потери в древесине могут быть определены как

$$P_0 = \rho J^2. \quad (8)$$

Здесь ρ и ξ представляют собой активную и реактивную составляющие удельного сопротивления древесины. Составляющие σ и ζ связаны соотношениями

$$\rho = \frac{\gamma}{\gamma^2 + \beta^2} \text{ и } \xi = \frac{\beta}{\gamma^2 + \beta^2}. \quad (9)$$

При переменном токе ρ и γ не являются обратными величинами. Только при постоянном токе, когда $\omega = 0$ и $\beta = 0$,

$$\rho(0) = \frac{1}{\gamma(0)}.$$

² В настоящей работе принимаются обозначения удельных величин проводимости и сопротивления $\sigma, \gamma, \beta, \zeta, \rho$ и ξ , соответствующие Y, G, B, Z, R и X для проводимости и сопротивления при переменных токах. Иногда удельные параметры обозначаются y_0, g_0, b_0, z_0, r_0 и x_0 , однако неудобство индексации в нашем случае затрудняет применение последних обозначений.

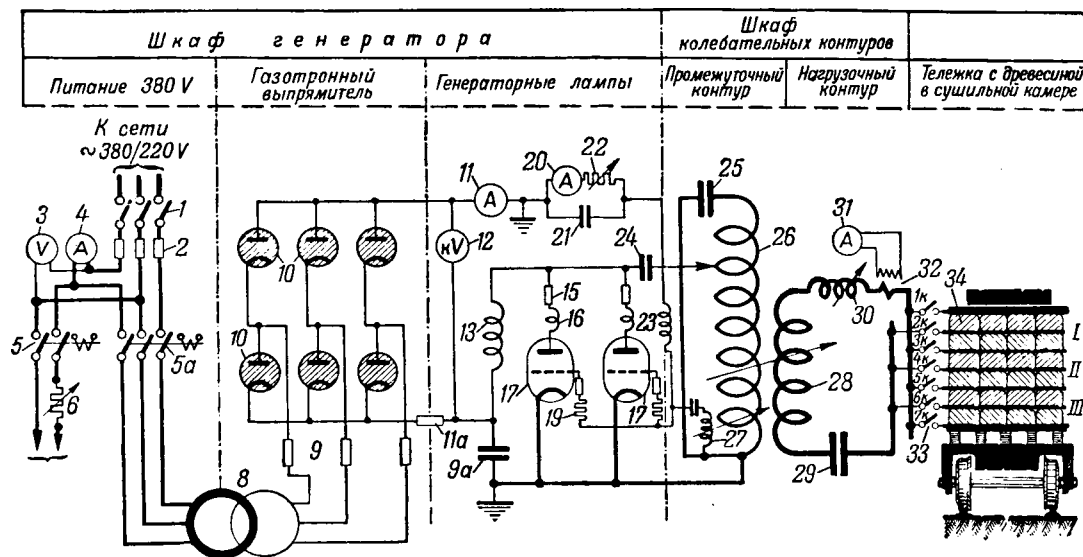


Рис. 5. Принципиальная схема высокочастотной установки мощностью 50 кВт.

1—общий рубильник; 2—предохранители; 3—вольтметр переменного тока; 4—амперметр переменного тока; 5—контактор накала; 6а—контактор анода; 6—реостат накала; 7—к индивидуальным трансформаторам накала; 8—анодный трансформатор; 9—предохранители газотронов; 11а—анодный предохранитель; 10—газотрон; 11—амперметр постоянного тока; 12—киловольтметр; 13—анодный дроссель; 9а—блокировочный конденсатор; 15—предохранители; 16—антипаразитный дроссель; 17—генераторные лампы; 18—предохранители цепи сетки; 19—антипаразитные сопротивления; 20—амперметр утечки сетки; 21—блокировочный конденсатор; 22—сопротивление утечки сетки; 23—дроссель сетки; 24—разделительный конденсатор; 25—конденсатор колебательного контура; 26—катушка колебательного контура; 27—катушка обратной связи; 28—катушка связи с нагрузкой; 29—укорачивающий конденсатор; 30—вариометр нагрузки; 31—тепловой амперметр; 32—трансформатор тока высокой частоты; 33—контакты на электродах; 34—древесина, подвергаемая сушке.

Так как при работе генератора реактивная составляющая штабеля древесины компенсируется индуктивностью вариометра, то величина ρ в значительной степени может характеризовать процесс.

На рис. 4 изображена зависимость ρ от влажности для березы. Кривая имеет резко выраженный максимум при влажностях 20—30%.

С повышением частоты этот максимум несколько смещается вправо. Из рис. 4 и формулы (8) нетрудно установить, что при последовательном включении нескольких образцов различной влажности нагрев этих образцов будет происходить неравномерно, причем влажные образцы могут нагреваться значительно медленнее, чем более сухие [Л. 7].

Генераторы для высокочастотной сушки древесины. Основным требованием, предъявляемым к генераторам для сушки древесины, является возможность поддержания необходимого теплового режима при сохранении высокого к. п. д. Выполнение этого требования осложняется тем, что в процессе нагрева и сушки параметры древесины сильно изменяются; с ростом температуры проводимость штабеля растет, а с понижением влажности падает. Таким образом, для обеспечения заданного режима нагрева необходимо иметь возможность регулировать мощность, отдаваемую генератором при сохранении высокого к. п. д. Наибольшее распространение в настоящее время получили установки полезной мощностью 10 и 50 кВт [Л. 11, 12, 13].

Принципиальная схема установки полезной мощностью 50 кВт, разработанной А. Н. Мазниным, изображена на рис. 5. Конструктивно генератор выполняется в виде двух шкафов—ге-

нераторного шкафа, содержащего аппаратуру питания, выпрямитель и генераторные лампы и шкафа колебательных контуров, объединяющего промежуточный и нагрузочный контуры. В качестве первого шкафа после некоторых пересоединений может быть применен и закалочный агрегат соответствующей мощности.

Необходимый тепловой режим нагрева и оптимальный к. п. д. обеспечиваются путем изменения связи между контурами (переменная связь между контурами 26 и 28), угла отсечки генераторных ламп (обратная связь 27 и утечка сетки 22), настройкой нагрузочного контура в резонанс (вариометр 30) и согласованием нагрузки путем изменения анодной связи. В связи с тем, что для разогрева древесины требуется значительно большая удельная мощность, чем для поддержания теплового режима, предусматривается возможность включения нагрузки секциями.

Средний промышленный к. п. д. такого генератора порядка 60%. Диапазон частот: 300—1000 кГц. Производительность установки: порядка 6 м³ в сутки; однако есть основания полагать, что применением секционированного включения нагрузки и комбинированного нагрева токами высокой частоты при внешнем обогреве можно значительно повысить производительность установки.

Технология сушки и пропитки древесины. Для нагрева древесины токами высокой частоты применяются различные конструкции электродов.

В настоящее время получили распространение два типа электродов—горизонтальные сетчатые и вертикальные [Л. 7, 8, 11, 14].

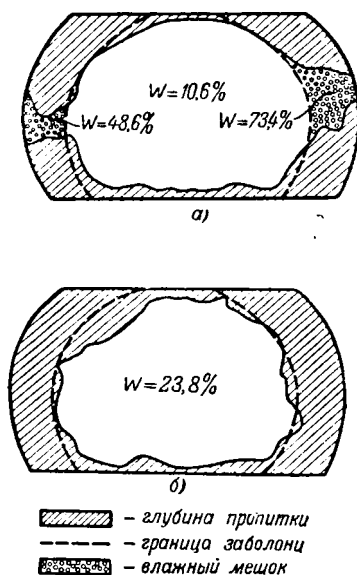


Рис. 6. Разрезы пропитанных шпал.
а — при непрерывной сушке; б — при ступенчатой сушке.

Первый тип представляет собой металлическую сетку, иногда обшитую слоем ткани, которая прокладывается между рядами уложенной древесины и подключается к источнику питания. Плотное прилегание электродной сетки к поверхности древесины обеспечивает благоприятное распределение токов, при котором во влажных участках, включенных параллельно с более сухими, выделяется значительно больше тепла. В этом нетрудно убедиться, если обратиться к формуле (6) и рис. 2. Введение воздушного зазора между электродом и древесиной существенно изменяет токораспределение. При зазоре в несколько миллиметров плотность тока распределяется относительно равномерно по древесине и нагрев оказывается пропорционален не активной проводимости, а активному сопротивлению ρ [Л. 7]. В таком случае возможны явления неблагоприятного нагрева такого же характера, как и в рассмотренном выше случае последовательного включения различных образцов древесины.

Второй тип представляет собой подвешенные вертикально передвигающиеся по направляющим сетчатые электроды, между которыми помещается штабель уложенной древесины.

Конструктивно вертикальные электроды удобнее горизонтальных и укладка древесины в этом случае оказывается проще. Однако при вертикальной конструкции электродов неизбежно появление неравномерных и довольно значительных воздушных зазоров между древесиной и электродами. Наличие зазора сопряжено с неравномерностью нагрева и сушки древесины, иногда приводящей к браку. Последнее обстоятельство послужило основанием для того, чтобы отдать предпочтение горизонтальным электродам, плотно прилегающим к поверхности древесины.

Тем не менее, даже при горизонтальных прижимных электродах иногда возможна неоднородность нагрева. Так, например, при сушке сосновых шпал, уложенных между горизонтальными электродами, вследствие неравномерного распределения влаги между ядром и заболонью, а также вследствие анизотропности древесины, часто получается неравномерная сушка.

Пример неравномерно высушенной шпалы приведен на рис. 6,а. Как видно из чертежа, в результате сушки шпалы, уложенной между горизонтальными электродами, ядерная часть древесины высохла до конечной влажности 10,6%, в то время, как в центральных участках заболони остаточная влажность достигает 73,4%. Такая неравномерность сушки может быть легко объяснена, исходя из анизотропности электрических параметров древесины. Так как радиальная проводимость древесины значительно выше тангенциальной (рис. 2), то с горизонтальных поверхностей древесины ток устремляется к центру, в результате чего примыкающие к электродам части заболони и ядро нагреваются и высыхают скорее, вытесняя влагу в центральную часть заболони. При последовательном же соединении более сухих и более влажных участков заболони первые нагреваются и высыхают скорее.

Описанная выше неравномерность нагрева и сушки полностью устраняются применением метода ступенчатой сушки, предложенного П. В. Гужевым и К. П. Семенским. Если древесину нагреть даже при наличии неравномерности до температуры порядка 100°, а затем медленно охлаждать, то при конденсации водяных паров, заполняющих поры древесины в них образуется разрежение, в результате которого влага из более влажных участков всасывается в поры более сухой древесины; происходит естественное выравнивание влажности и последующий нагрев токами высокой частоты происходит более равномерно. Пример последовательности включения секций нагрузки при ступенчатой сушке для схемы рис. 5:

Время в часах	№№ включенных контактов
2	7к, 6к, 5к
2	5к, 4к, 3к
2	3к, 2к, 1к
4	7к, 6к, 5к, 4к, 3к
16	7к, 6к, 5к, 4к, 3к, 2к, 1к

В результате ступенчатой сушки древесина высыхает равномерно по всему сечению.

Погружение равномерно высушенной разогретой древесины в масляный антисептик приводит к пропитке всей заболонной древесины: обнаженных участков ядра на глубину до 10 см. На рис. 6 заштрихованными участками показана пропитанная древесина. Как видно из рисунка при непрерывной сушке (6,а) возможно образование водяных мешков, тогда как ступенчатая сушка (6,б) обеспечивает равномерную сушку и пропитку древесины.

Штабель уложенных шпал объемом до 7 м³ изображен на рис. 7. На фотографии видны горизонтальные сетчатые электроды.

Можно рассчитывать, что метод ступенчатой сушки при вертикальной конструкции электродов позволит добиться равномерной сушки, при эксплуатационно более удобной системе электродов.

Перспективы внедрения высокочастотной сушки и пропитки древесины. В результате опыта эксплуатации ряда установок для сушки древесины можно наметить следующие области применения высокочастотной сушки и пропитки древесины.

1. Частичная сушка и пропитка опор линий электропередачи, свай и частей гидротехнических сооружений, подверженных поражению грибом и древоточцем [Л. 14, 18].

2. Сушка и пропитка железнодорожных шпал [Л. 17].

3. Качественная сушка брусьев крупных сечений (например, вагонных брусьев и мостовых ферм) [Л. 15, 16].

4. Сушка древесины, применяемой в машиностроении, кораблестроении и ряде других областей.

5. Сушка древесины, употребляемой в заводском производстве строительных деталей и столярных изделий для промышленных и гражданских зданий.

Подвижность высокочастотных установок для сушки и пропитки древесины и возможность приближения их непосредственно к месту лесозаготовок, быстрота и высокое качество сушки позволяет рекомендовать этот метод в определенных условиях для широкого внедрения.

Литература

1. С. Н. Абраменко. Механическая обработка дерева, № 10, стр. 60, 1934.
2. А. И. Иоффе. Авторское свидетельство № 39960 по заявке от 7 апреля 1933.
3. С. Н. Селюгин, С. Н. Абраменко и др. Сушка и нагрев древесины в поле токов высокой частоты. Лесстехиздат, 1938.
4. Mittlemar, Stephen. Wood Products, № 10, стр. 16, 1941.
5. В. М. Власенко. Сборник Всесоюзного Государственного треста по проектированию предприятий кожевенной промышленности, № 8, стр. 99, 1939.
6. А. А. Чиженов. Электричество, № 9, стр. 71, 1947.

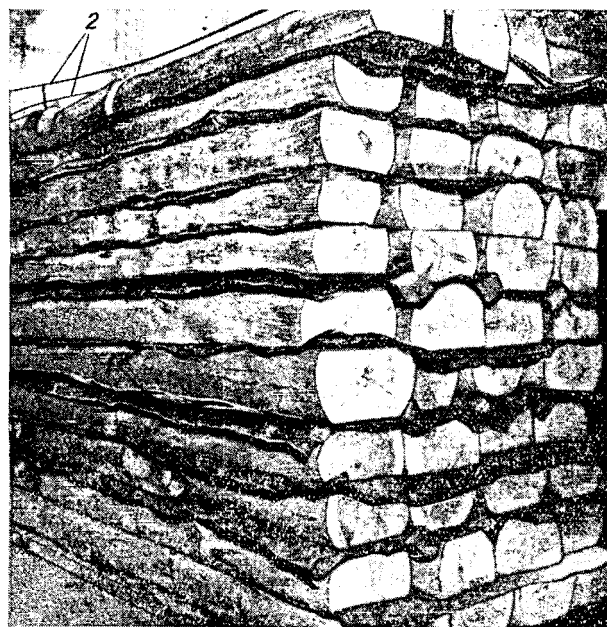


Рис. 7. Сушка железнодорожных шпал токами высокой частоты.

1—сетчатые электроды; 2—подводка тока высокой частоты.

7. А. В. Нетушил. Вестник инженеров и техников, № 4, стр. 141, 1947.
8. С. Д. Жоров и И. А. Аршинов. Сборник материалов по обмену опытом Главпромстроя МВД, № 2, стр. 3, 1947.
9. Taylor. Transactions of the A. S. M. E. т. 65, № 3, 1943.
10. Физический словарь ОНТИ, т. 1, стр. 154, 1936; т. V, стр. 79, 1939.
11. А. В. Нетушил. Сушка и пропитка древесины. ИТЭИН Госплана СССР, 1947.
12. А. В. Нетушил. Промышленная энергетика, № 10, стр. 13, 1947.
13. А. Н. Мазнин. Промышленная энергетика, № 10, стр. 11, 1947.
14. К. П. Семенский. Промышленная энергетика, № 11—12, 1946.
15. А. Н. Мазнин. Радиофронт, № 4, 1941.
16. Л. С. Левин, В. Н. Попов и В. А. Попов. Строительная промышленность, № 9, 1945.
17. К. П. Семенский. Строительная промышленность, № 1, 1948.
18. В. Н. Ефремов. Гидротехническое строительство, № 1, 1948.



Унификация высокочастотных установок

Инж. Д. Б. МОНДРУС, инж. С. М. МАРГОЛИН и инж. В. М. ЗИЛЬБЕРМАН

Трест „Электропечь“ Министерства электропромышленности СССР

Среди разнообразных новых методов термообработки, нашедших широкое применение за последнее десятилетие, исключительное место занимает термообработка токами высокой частоты. Не подлежит сомнению, что в настоящее время рациональная организация технологического процесса самых различных производств на уровне современной техники немыслима без применения токов высокой частоты.

В Советском Союзе вопросами использования высоких частот для целей нагрева занимаются достаточно давно. По решению ряда проблем работы наших заводов и научно-исследовательских организаций опережали и опережают аналогичные исследования за рубежом. Создание необходимого оборудования для высокочастотных установок не представляет для нашей электропромышленности никаких принципиальных трудностей. Задача сейчас сводится к организации серийного производства отдельных элементов этих установок и изготовлению достаточного количества типов комплектных установок. Для успешного разрешения этой задачи необходимо разработать шкалу частот, мощностей и напряжений для всех типов высокочастотных установок унифицированной серии, затем выбрать принципиальные схемы установок и характеристики основного оборудования. Результаты работы, проведенной «Севзаппромэлектропечь» в этом направлении, изложены ниже.

Шкала частот. При выборе шкалы частот необходимо исходить из ряда положений, в которых основным является возможность осуществления всех видов термообработки и плавки при высоких тепловом и электрическом коэффициентах полезного действия.

Не нарушая требования высокой экономичности процессов, вполне возможно допустить в широком диапазоне частот—от нескольких сот герц до десятков миллионов герц, нашедших применение в высокочастотной электротермии, значительные разрывы. Это важно и необходимо с точки зрения сокращения номенклатуры и простоты

Необходимость разработки типовой серии установок для высокочастотной электротермии является насущной задачей дня, предопределяющей быстрое внедрение этого вида техники в промышленность Советского Союза. Подводится итог работе, проведенной «Севзаппромэлектропечь» по разработке серии стандартных высокочастотных электротермических установок, рекомендуемых для серийного изготовления и внедрения в промышленность. Представляет существенный интерес получение отзывов от работников, занимающихся эксплуатацией высокочастотных электротермических установок в различных областях промышленности, по предлагаемой номенклатуре типовых установок.

оборудования. Практически можно ставить вопрос о ряде диапазонов, выбор которых будет обусловлен существующими типами генераторов высокой частоты.

В настоящее время в промышленной электротермии широко применяются два основных типа генераторов повышенной и высокой частоты: ма-

шинные, изготовляемые на частоты до 10 000 Hz и ламповые — на частоты от 100 000 до нескольких миллионов герц.

Для диапазона от 10 000 до 100 000 Hz в настоящее время нет достаточно качественных генераторов. Серьезной необходимости в создании подобных генераторов нет, так как все известные технологические процессы могут быть удовлетворены одним из указанных типов преобразователей.

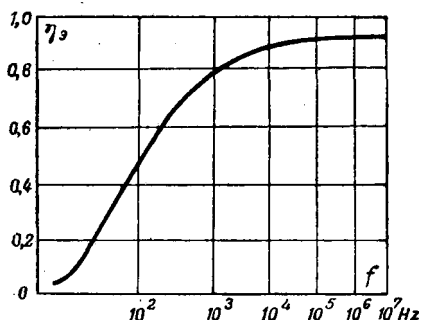
При определении факторов, влияющих на выбор частоты, следует отдельно рассматривать глубоко различающиеся процессы индукционного нагрева—поверхностная закалка и плавка—и диэлектрического—емкостного.

При индукционном нагреве металлов электрический к. п. д. системы индуктор—металл сначала резко возрастает до известного предела с увеличением применяемой частоты f . К своему предельному значению к. п. д. приближается асимптотически (рис. 1).

В. П. Вологдин (В. Вологдин. Поверхностная индукционная закалка, Оборонгиз, стр. 178, 1947) предлагает приближенную формулу для определения минимальной частоты, соответствующей значению технически приемлемого электрического к. п. д. для цилиндрических деталей:

$$f \geq \frac{20\,000}{d^2}, \text{ где } d — \text{диаметр стальной детали в см.}$$

Согласно этой формуле при изменении диаметра от 1 до 20 см частота соответственно изменяется от 20 000 до 50 Hz. Таким образом, условия высокого к. п. д. для подавляющего большинства систем индуктор—металл могут быть получены при использовании диапазона частот



ж 1. Электрический к. п. д. системы индуктор-изделие (диаметр изделия — 60 мм индуктора—65 мм).

получаемых от машинных генераторов. Для плавки металлов имеет место та же зависимость, однако в этом случае следует учитывать возможные размеры отдельных кусков шихты. Применение для плавильных печей частот, значительно превышающих минимальные значения, недопустимо, так как это приводит к чрезмерным значениям напряжения на виток индуктора.

Средние данные по индукционным печам, изготовляемым как в Советском Союзе, так и за рубежом, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Емкость печи, kg	Частота тока, Hz
До 10	200 000—100 000
10—25	15 000—10 000
50—500	3 000—1 000
1 000—3 000	1 000—500

При применении индукционного нагрева для поверхностной закалки в основу выбора частоты кроме получения высокого электрического к. п. д. положен ряд соображений. Основные из них—это высокая производительность процесса и высокий тепловой к. п. д. Оба эти условия в принципе удовлетворяются тогда, когда глубина проникновения тока приблизительно равна глубине закалки.

На основании данных лаборатории В. П. Вологодина в табл. 2 приведена рекомендуемая ча-

Таблица 2

Глубина закалки, мм	Частота тока, Hz
10—20	500
4—10	2 000
2—6	5 000
2 и менее	10 000 и более

стота тока в зависимости от глубины закалки для простых цилиндрических деталей. Как видно, условия получения максимальной производительности и высокого теплового к. п. д. для большинства деталей удовлетворяются применением частот машинных генераторов.

В случае закалки поверхностей сложной формы получение удовлетворительного распределения температуры по глубине закаливаемого сечения зачастую требует применения частоты радиодиапазона. В частности, в цитированной выше работе В. П. Вологодина приводится (стр. 121) формула для выбора частоты при закалке шестерен. В общем следует указать, что в огромном большинстве случаев для целей поверхностной закалки применяются радиочастоты, лежащие в пределах 100 000—300 000 Hz.

Емкостной нагрев не проводящих ток материалов требует значительно более высокой частоты. Диапазон применяемых для этой цели частот весьма широк. Тем не менее промышленная практика и расчет частоты для ряда материалов выявили определенные практические пределы частот. Нормально диапазон потребных частот лежит в пределах $1 \cdot 10^6$ — $20 \cdot 10^6$ Hz и только в редких случаях повышается до 30 — $50 \cdot 10^6$ Hz, главным образом в установках малой мощности. Для нижнего предела встречаются исключения при сушке больших партий некоторых пород древесины до влажности порядка 20—25%, когда применяемая частота лежит в пределах 0,5— $0,7 \cdot 10^6$ Hz.

К вопросу установления определенных значений частот для ламповых и машинных генераторов следует подходить с разных точек зрения. Практически для очень широкого диапазона частот конструкция лампового генератора не изменяется. Изменяются лишь параметры колебательного контура, что предусматривается в конструкции элементов контура. Как правило, любой ламповый генератор предусмотрен для работы в определенном и часто весьма широком диапазоне частот. В отношении ламповых генераторов достаточно поэтому установить на основе изложенных соображений о выборе частот диапазоны, определяющие тип и характерные конструктивные особенности генераторов, приведенные в табл. 3.

Таблица 3

Диапазон	Частота, MHz	Волна, m
I	0,1—0,4	3 000—750
II	1—5	300—60
III	Свыше 5 и до 30	Менее 60 и до 10

Диапазон I табл. 3 предназначен для закалочных и плавильных установок, II—для установок диэлектрического нагрева большой и средней мощности, диапазон III предусмотрен для установок диэлектрического нагрева малой мощности, применяемых в случаях, требующих весьма высокой частоты, получение которой при больших мощностях представляет значительные трудности.

Вопрос о выборе определенных частот для машинных генераторов требует более всестороннего подхода, поскольку каждая частота озна-

чает отдельный тип в номенклатуре генераторов. Необоснованное расширение номенклатуры безусловно нежелательно.

Установки с машинными генераторами, осуществленные в Советском Союзе, имели своей базой генераторы на частоты 500, 2 000, 2 500, 10 000 и 15 000 Hz. Основная масса установок базировалась на генераторах с частотой 2 000 Hz.

Сохранение столь широкой номенклатуры ничем не оправдано. В частности, в промышленности США в диапазоне машинных частот используют только три частоты: 960, 3 000 и 9 600 Hz. На основе ряда проведенных расчетов и исследований генераторы этих трех частот вполне удовлетворяют всем требованиям плавки, заковки, нагрева под поковку, штамповку и т. д., и нет никаких оснований для установления дополнительных величин частот в стандартной шкале в пределах этого диапазона. При частоте питающей сети 50 Hz следует рекомендовать следующие стандартные значения частот генераторов: 800, 2 500 и 8 000 Hz.

Шкала мощностей. По назначению установки могут быть, как указано выше, разбиты на три группы: индукционной плавки, индукционного нагрева и диэлектрического нагрева.

На основе длительной практики работы «Севзаппромэлектропечь» в области высокочастотной электротермии и изложенных только что соображений можно сделать следующие заключения в части выбора шкалы мощностей ламповых генераторов:

1. Мощности до 25 kW удовлетворяют ряд запросов промышленности, в которой используется диэлектрический нагрев в небольших масштабах (нагрев пластмасс перед прессовкой, сушка дерева в небольших количествах, обработка пищевых продуктов и т. д.), а также обеспечивают постановку любого эксперимента в лабораторных условиях при решении новых вопросов.

2. Значительное количество процессов, осуще-

ствляемых в промышленности в более крупных масштабах, обеспечивается установками мощностью до 100 kW.

3. Уникальные установки мощностью свыше 100 kW должны компоноваться из типовых блоков мощностью по 100 kW.

Переходя к вопросу о выборе мощности машинных генераторов, следует отметить, что анализ опыта применения машинных генераторов в отечественной промышленности и за рубежом, а также изучение потребностей союзной промышленности, проведенное «Севзаппромэлектропечью» в 1940 г., показывают, что установки с машинными генераторами мощностью в пределах от 50 до 1 000 kW удовлетворяют все потребности различных отраслей промышленности.

Шкала напряжений. Исходя из технических данных выпускаемых в СССР генераторных и выпрямительных ламп и номинальных шкал напряжений силовых трансформаторов, следует принять два напряжения для питания выпрямительных ламповых генераторов: 6,3 kV для генераторов мощностью до 10 kW и 10 kV для генераторов мощностью от 30 kW и больше. Напряжение питания анодов ламп при обычном соединении выпрямительных ламп по трехфазной мостовой схеме составит соответственно 8 500 и 13 500 V.

Выше были определены значения мощностей и частот машинных генераторов в зависимости от назначения установок. На этой основе следует произвести выбор величины напряжения генераторов.

Изучение параметров существующих конструкций генераторов позволяет сделать следующие общие выводы: 1) как правило, генераторы конструируются с обмоткой, состоящей из двух секций, что позволяет иметь два напряжения; 2) генераторы, предназначенные для индукционного нагрева под поверхностную закалку, имеют напряжения более низкие, чем генераторы для питания плавильных печей.

Таблица 1

Тип генератора	Мощность, kW	Частота, Hz	Напряжение генератора или анодов ламп, V	Назначение генератора	Принципиальная схема установки по рисунку
Ламповый	6	$5 \cdot 10^6 - 30 \cdot 10^6$	8 500	Нагрев диэлектриков	2
	10	$5 \cdot 10^6 - 30 \cdot 10^6$	8 500	Нагрев диэлектриков	2
	30	$10^5 - 4 \cdot 10^5$	13 500	Плавка, индукционный нагрев	4 и 3, схема а
	30	$10^6 - 5 \cdot 10^6$	13 500	Нагрев диэлектриков	3, схема б
	60	$10^5 - 4 \cdot 10^5$	13 500	Индукционный нагрев	3, схема а
	60	$10^6 - 5 \cdot 10^6$	13 500	Нагрев диэлектриков	3, схема б
	100	$10^5 - 4 \cdot 10^5$	13 500	Индукционный нагрев	3, схема а
	100	$10^6 - 5 \cdot 10^6$	13 500	Нагрев диэлектриков	3, схема б
Машинный	50	2 500	300/600	Плавка	6
	50	8 000	300/600	Индукционный нагрев	5
	100	2 500	500/1 000	Плавка	6
	100	8 000	300/600	Индукционный нагрев	5
	250	2 500	500/1 000	Плавка и индукционный нагрев	5 и 6
	250	8 000	300/600	Индукционный нагрев	5
	500	800	750/1 500	Плавка	6
	500	2 500	500/1 000	Индукционный нагрев	5

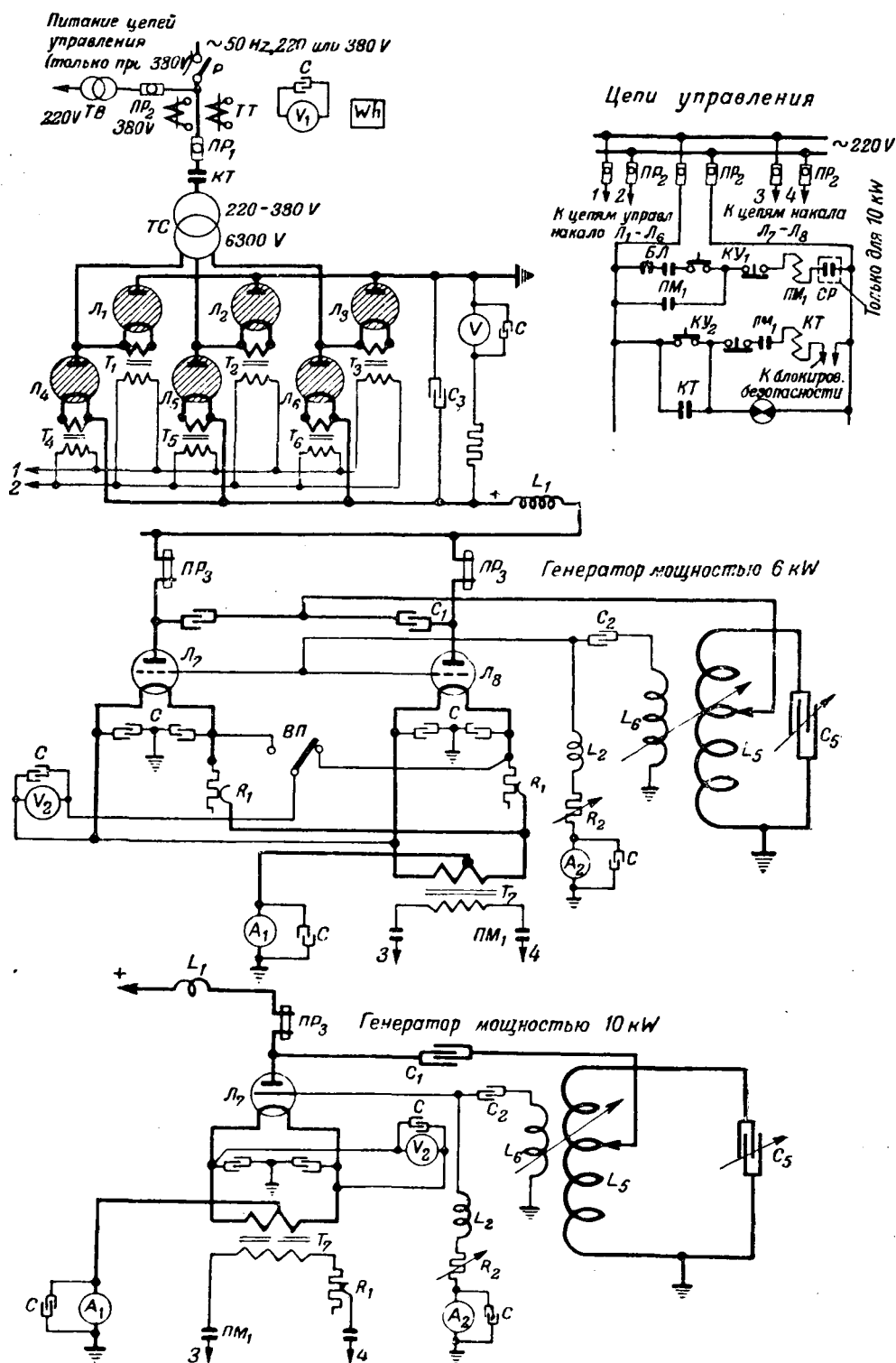


Рис. 2. Принципиальные схемы установок диэлектрического нагрева мощностью 6 и 10 kW.

Наша отечественная практика в области конструирования закалочных трансформаторов, значительно опередившая иностранную, показывает, что рациональные конструктивные и электрические параметры трансформаторов легко достигаются при первичном напряжении до 800—1 000 V. Повышение напряжения генератора приводит к увеличению габаритов и потерь в шинах высокой

частоты и является весьма желательным. Типовые установки для закалки, однако, как правило, осуществляются в общем корпусе с водяным охлаждением и, следовательно, имеется повышенная опасность нарушения изоляции и максимальное напряжение генераторов для закалки следует принять равным порядка 600 V для мощностей до 250 kW.

Для генераторов, которые могут быть использованы для глубокого прогрева и для плавки, максимальное напряжение следует выбрать несколько более высоким в целях улучшения параметров печи—порядка 1000 В.

Наконец, для самых крупных печей по соображениям потерь в шинах высокой частоты и улучшения параметров печи максимальное напряжение может быть принято порядка 1500 В.

Шкала генераторов. В табл. 4 приведена шкала ламповых и машинных генераторов, предлага-

емая в качестве стандарта для промышленности Советского Союза. Для шкалы типовых установок предусматривается 8 типов ламповых и 8 типов машинных генераторов. Установки с ламповыми генераторами при мощности свыше 100 кВт проектируются из блоков, каждый мощностью по 100 кВт по специальному заказу. Установки с машинными генераторами мощностью 500 кВт, 8000 Hz (для специальных случаев индукционного нагрева) и установки мощностью 1000 кВт, 800 Hz (плавильные трехтонные печи) осуществляются путем спаривания соответствующих типовых генераторов.

Принципиальные схемы установок. На основе табл. 4 в «Севзаппромэлектропечь» разработаны рекомендуемые схемы типовых установок, показанные на рис. 2—6.

Типовые установки для диэлектрического нагрева предусматриваются на 6, 10, 30, 60 и 100 кВт (рис. 2 и 3, схема).

Питание этих установок во всех случаях производится от сети 220 и 380 В через повысительный трансформатор ТС. Выпрямитель собирается на газотронах Л1—Л6 по мостовой схеме. Генератор собран на одной генераторной лампе Л7 или на двух Л7—Л8, соединенных в параллель; работает он на колебательный контур, состоящий из катушки самоиндукции L5 и конденсатора переменной емкости С5, являющегося одновременно элементом, в котором производится нагрев материала. Генератор получает возбуждение от колебательного контура по схеме Майснера посредством катушки обратной связи L6.

В установках мощностью 6 и 10 кВт (рис. 2) включение напряжения на анод лампы помощью контактора КТ является одновременно началом генерации. В установках мощностью 30, 60 и

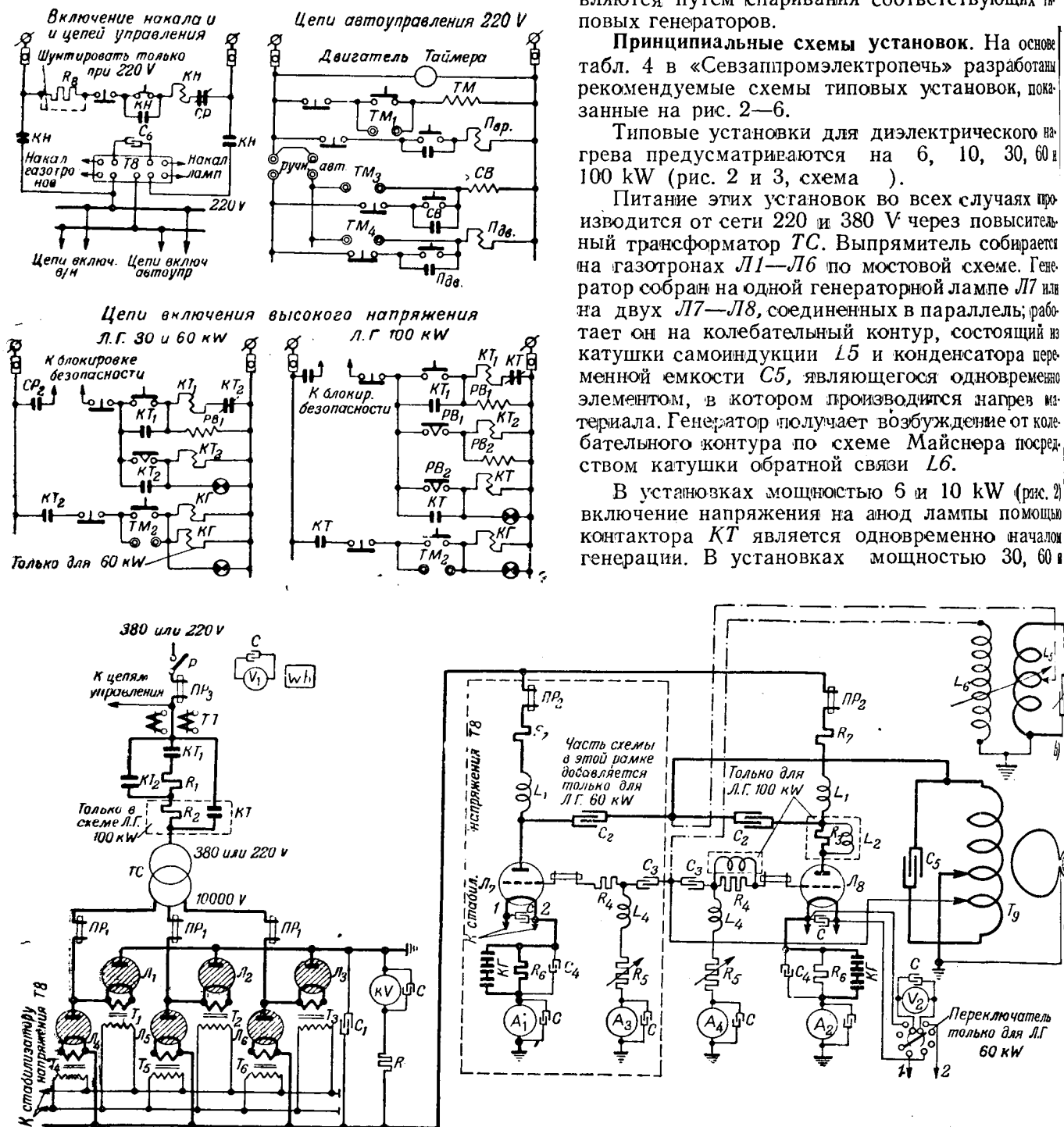


Рис. 3. Принципиальные схемы установок для термообработки (схема а) и диэлектрического нагрева (схема б) мощностью 30, 60 и 100 кВт.

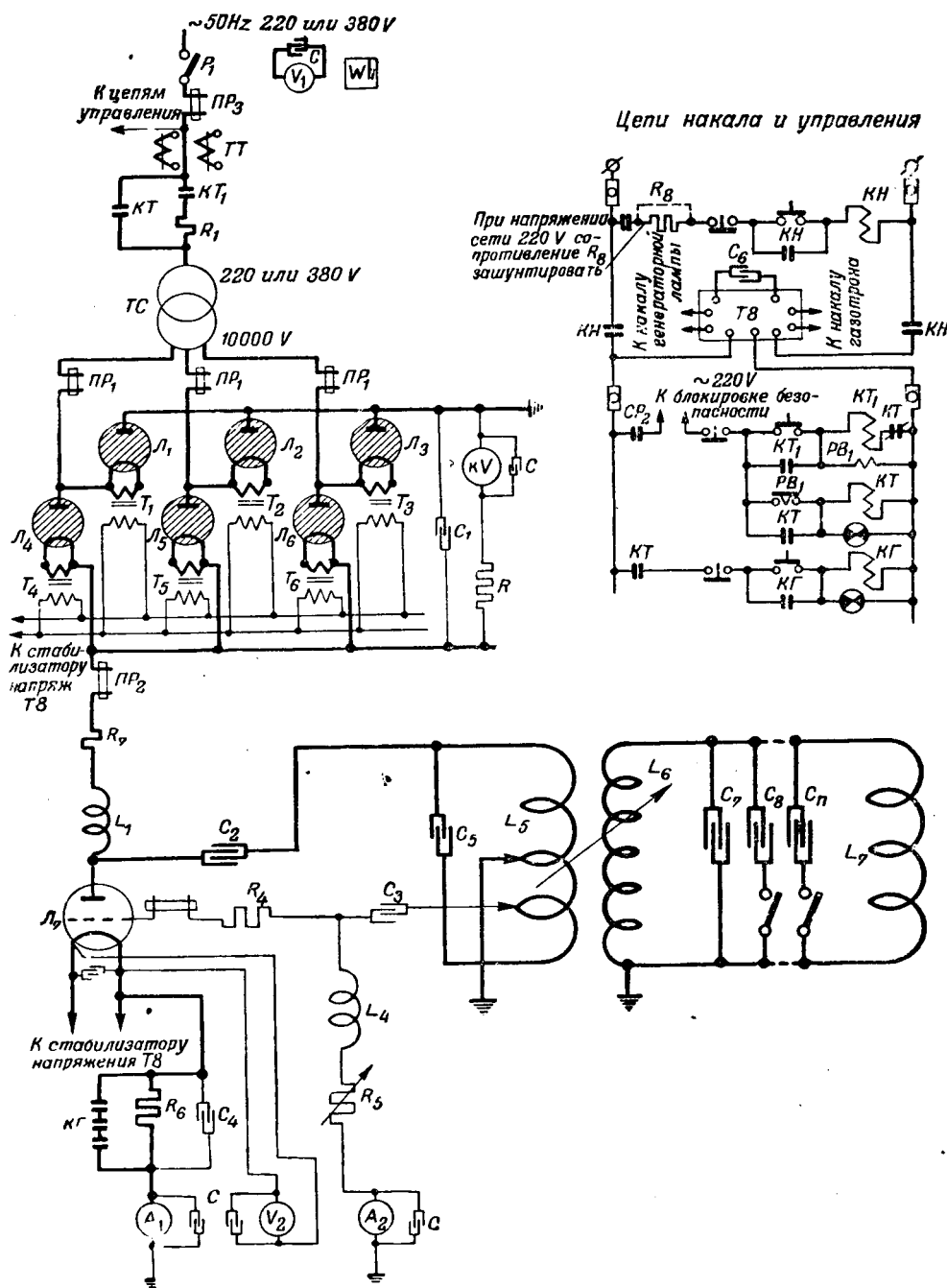


Рис. 4. Принципиальная схема плавильной установки мощностью 30 kW с ламповым генератором.

100 kW (рис. 5, схема *b*) включение высокого напряжения производится автоматически при помощи реле времени $PB1$ и $PB2$, ступенями, начиная от 50% номинального. Для установок 30 и 60 kW приняты две ступени подъема напряжения, для установок 100 kW—три ступени. При двухступенчатом пуске первым включается контактор $KT1$, подключая трансформатор к сети через сопротивление $R1$; затем включается контактор $KT2$, шунтируя $R1$. При трехступенчатом пуске контакторы $KT1$, $KT2$ и KT включаются последовательно, шунтируя сопротивления $R1$ и $R2$.

Включение ступенями высокого напряжения производится при запертых лампах. Отпирание и

запирание ламп осуществляется схемой, разработанной и испытанной в «Севзаппромэлектропечь». Подача запирающего потенциала на сетку лампы и снятие его производится выключением или включением контактора $КГ$, шунтирующего сопротивление 6, включенное между катодом лампы и «землей».

Питание накала лампы в генераторах 6 и 10 kW производится через трансформатор накала $T7$ и регулируется реостатами $R1$. В более мощных установках питание накала осуществляется через феррорезонансный стабилизатор напряжения $T8$.

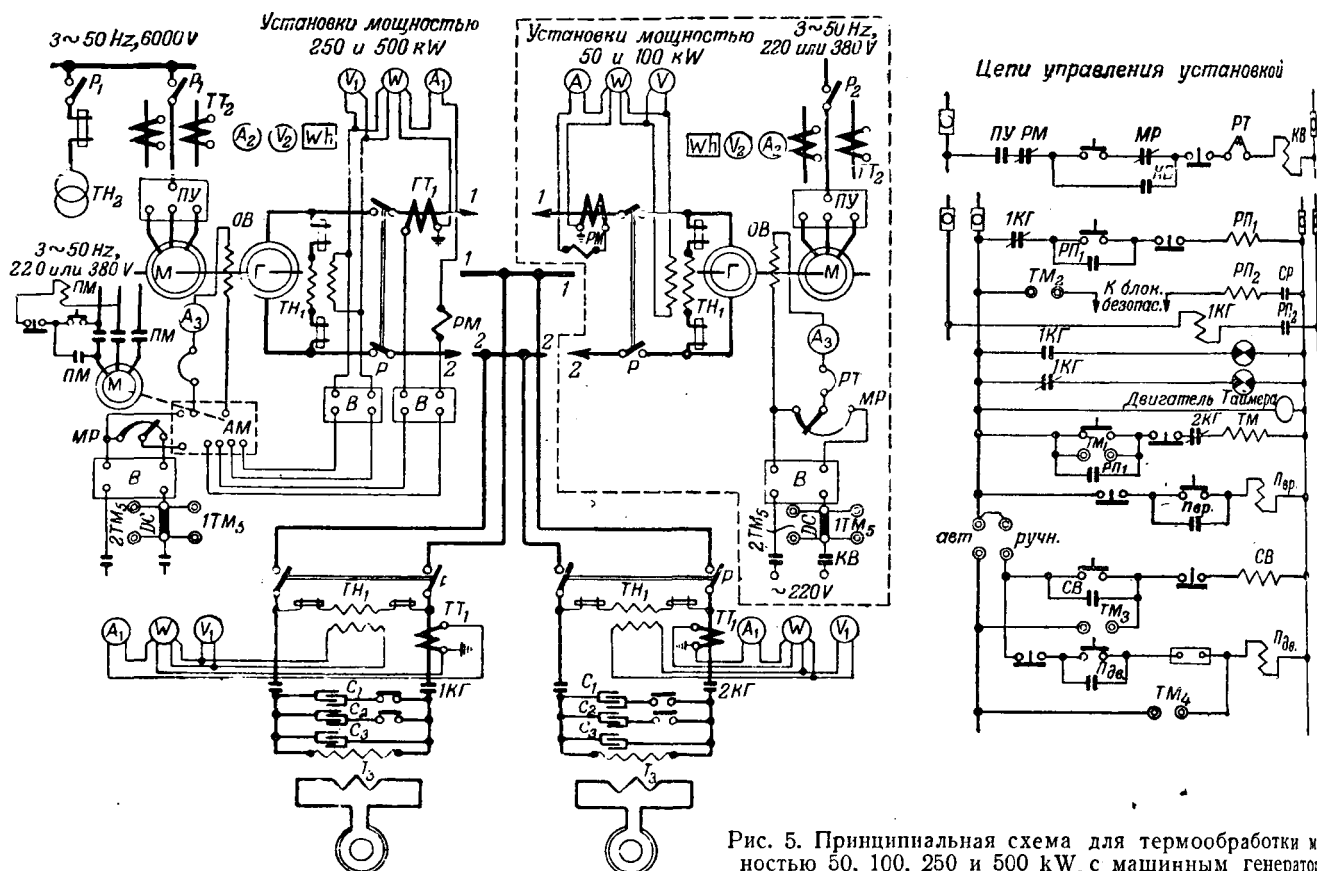


Рис. 5. Принципиальная схема для термообработки мощностью 50, 100, 250 и 500 кВт с машинным генератором

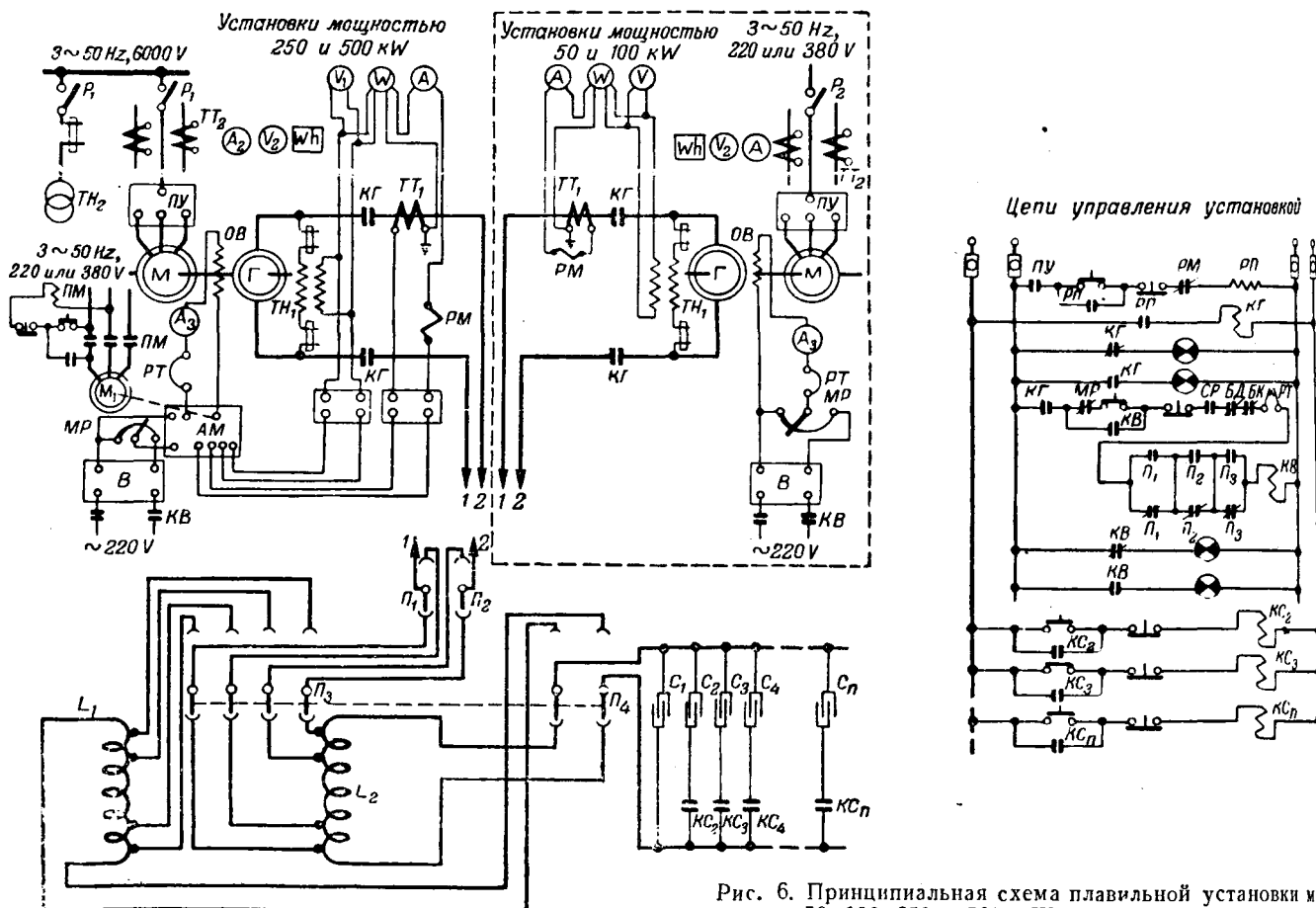


Рис. 6. Принципиальная схема плавильной установки мощностью 50, 100, 250 и 500 кВт с машинным генератором

Блокировка цепей схемы управления обеспечивает определенную заданную последовательность включения.

Плавильные установки с ламповыми генераторами предусматриваются мощностью 30 kW (рис. 4). Схема главных цепей и цепей управления построена аналогично описанному выше, за исключением колебательного контура. Генератор работает на двухконтурную схему. Анодный контур связан с генератором по схеме Хартлея. С анодным контуром индуктивно связан печной контур, состоящий из индукционной печи L_7 и секционированной батареи конденсаторов $C7 \dots Cn$.

Установки для термообработки с ламповыми генераторами предусматриваются мощностью 30, 60 и 100 kW (рис. 3, схема а). Построение всех цепей питания, выпрямления и пуска этих установок совершенно аналогично описанному выше для установок такой мощности. Колебательный контур состоит из батареи конденсаторов $C5$ и воздушного трансформатора $T9$ и соединен с генератором по трехточечной схеме. Установка имеет схему автоматического управления процессом термообработки, основанную на применении многопозиционного моторного реле времени — таймера TM . При включении схемы в работу таймер TM в определенной последовательности с выдержкой времени включает своими контактами $TM1—TM4$, за каждый цикл термообработки, нагрев, закалочную воду и движение детали (контакты $KГ$, $СВ$ и $ПД$).

Плавильные установки и установки для индукционного нагрева с машинными генераторами предусматриваются мощностью 50, 100, 250 и 500 kW (рис. 5 и 6). Питание приводного двигателя M производится от сети 220 или 380 V в установках 50 и 100 kW и 6 000—в установках 250 и 500 kW.

Схема пускового устройства $ПУ$ выбирается в соответствии с данными питающей сети. Возбуждение генератор $Г$ получает в установках 50 и 100 kW от сети переменного тока 220 V через купроксный или селеновый выпрямитель B , в бо-

лее мощных установках возбуждение подается через амплитудный регулятор $АМ$.

К резонансному контуру генератор подключается при помощи контактора $KГ$. В плавильных установках резонансный контур состоит из двух печей $L1$ и $L2$, подключаемых поочередно к секционированной батарее конденсаторов $C1 \dots Cn$. Подключение секций предусматривается контакторами $KС2—KСn$. Схема подключения генератора к резонансному контуру допускает подключение по автотрансформаторной схеме, позволяющей иметь три ступени повышенного напряжения на печи.

Схема управления питается от сети напряжением 220 V. Включение цепей производится в определенной последовательности, обеспечиваемой блокировками.

В установках для индукционного нагрева нагрев осуществляется при помощи резонансного контура, составленного из батареи конденсаторов $C1—C3$ и нагревательного трансформатора $T3$. Каждый контур имеет схему управления процессом нагрева, основанную на применении таймера и описанную выше. Схема предусматривает возможность автоматического включения контактора $2KГ$ на втором станке при выключении контактора $1KГ$ первого станка, и наоборот. Схема пуска двигателя и управления возбуждением генератора аналогична таковой для плавильных установок.

Схемы и их краткое описание дают представление о довольно разнообразной номенклатуре специального оборудования, требующегося для производства серии типовых установок. К освоению союзной промышленностью серийного выпуска необходимого оборудования сделаны уже реальные шаги. В целях, однако, более широкого и бесперебойного удовлетворения насущных запросов самых разнообразных отраслей промышленности необходимы ускорение освоения всей номенклатуры оборудования и аппаратуры для типовых высокочастотных установок и организация специализированного завода для комплексного их производства на основе самого широкого кооперирования с другими заводами.



Пути усовершенствования установочных проводов сильного тока

Кандидат техн. наук П. Н. ГОРШКОВ

Завод Министерства электропромышленности СССР

Установочные провода и кабели с резиновой изоляцией составляют очень крупную часть общего выпуска кабельных изделий, поэтому усовершенствованию их конструкций и технологии изготовления должно быть уделено особо серьезное внимание.

В соответствии с послевоенным пятилетним планом выпуск кабельных изделий к 1950 г. должен значительно возрасти по сравнению с уровнем 1940 г. При большом росте выпуска нужно повысить и качество продукции, тем более что уже сейчас, в результате увеличения числа кабельных заводов и поступления значительного количества нового оборудования, имеются более благоприятные условия для освоения и внедрения новых конструкций.

Между тем в настоящее время как среди работников кабельных заводов, так и среди потребителей нет достаточной ясности в вопросе о том, какие изменения необходимо внести в конструкции установочных проводов и кабелей. В настоящей статье делается попытка разобрать этот вопрос. Ввиду обширности темы содержание статьи ограничено рассмотрением лишь принципиальных вопросов, связанных с оценкой основных наиболее распространенных конструкций установочных проводов.

Установочные провода для прокладки на роликах, на изоляторах и в трубах. Установочные провода этой группы в нашей практике изготавливаются в основном: одножильные марок ПР-380 и ПР-500, а двухжильные скрученные — марки ПРД-220 (цифра в обозначении типа — номинальное напряжение в вольтах). Остальные марки проводов этой группы (ПРГ, ПРТО и др.) изготавливаются в небольших количествах. Провода ПР выпускаются до сих пор в основном на напряжение в 380 В.

За границей основная масса одножильных установочных проводов изготавливается на напря-

Вопросы усовершенствования установочных проводов сильного тока, при существующей огромной потребности в этих проводах со стороны многочисленных отраслей народного хозяйства, приобретают большое экономическое и техническое значение. Отмечается отставание электропромышленности СССР в производстве установочных проводов, отвечающих современным требованиям. На основе сравнительного рассмотрения различных типов проводов выдвигаются предложения об улучшении их конструкции, о расширении номенклатуры проводов, о внедрении в производство новой электроизоляционной техники (например, хлорвиниловых пластикаторов и др.) и об изменении действующих стандартов проводов. Дискуссия по статье публикуется в настоящем номере.

жение не менее 500 В. Например, установочные провода типа ПР изготовлялись на напряжение в 750 В, и лишь во время войны было допущено изготовление проводов этого типа на напряжение в 380—220 В.

Качество изоляции проводов ПР-380 значительно ниже качества изоляции проводов ПР-500. Прежде всего, толщина изоляции проводов ПР-380 существенно меньше толщины изоляции проводов ПР-500 (табл. 1).

Таблица 1

Номинальное сечение жилы, мм ²	Номинальное напряжение, В		
	до 380	до 500	до 600
	Толщина изоляции, мм		
0,75÷6	0,6	1,0	1,2
10÷16	0,8	1,2	1,6
25÷35	0,8	1,4	1,6
50÷70	0,8	1,6	2,0
95÷120	1,0	1,8	2,4
150	1,2	2,0	2,4

Провода ПР-500 должны быть или полностью испытаны в воде при напряжении переменного тока в 2 000 В, или полностью пропущены через искровые аппараты сухого испытания при напряжении от 6 000 до 9 000 В, в то время как провода ПР-380 не подвергаются электрическим испытаниям и проходят только контрольную перемотку. Для изготовления изоляции проводов ПР-380 согласно ГОСТ В1977-43

Таблица 2

Тип резин	Удельное объемное сопротивление, $\Omega\text{см}$ не менее	$\text{tg}\delta$ не более	Пробивная прочность, кВ/мм не менее
РИ-1	$1 \cdot 10^{13}$	0,1	20
РИ-2	$1 \cdot 10^{13}$	0,2	15
РИ-3	Не нормируется	Не нормируется	10
РТИ-1	$1 \cdot 10^{13}$	0,1	20
РТИ-2	$1 \cdot 10^{12}$	0,2	15
РТИ-3	Не нормируется	Не нормируется	10

на установочные провода допускается применение резин РТИ-3 и РИ-3 (по ГОСТ 2068-43), качество которых значительно ниже качества резин РТИ-2 и РИ-2, применяемых для изоляции проводов ПР-500. Это видно из табл. 2, в которой приведены установленные ГОСТ 2068-43 электроизоляционные характеристики этих резин после пребывания их в воде в течение 24 ч при комнатной температуре.

При указанной выше малой толщине изоляции и низких требованиях к качеству изоляции проводов ПР-380 их по существу нельзя применять в сетях с напряжением больше 127 В по отношению к земле. Ввиду острого недостатка проводов ПР-500 монтажные организации вынуждены применять для скрытых прокладок провода ПР-380, что ведет к необходимости прокладки каждого провода в отдельных изолирующих резиновых трубках. Однако, и такая мера не может предохранить полностью провода от воздействия влаги. По свидетельству монтажных организаций, срок службы провода ПР-380 часто не превышает нескольких месяцев. Таким образом, массовый выпуск проводов ПР-380 ведет в конечном счете к огромному перерасходу меди и электроизоляционных материалов. Поэтому провода марки ПР-380 необходимо либо исключить из стандартов, либо резко повысить их качество. Точно так же необходимо пересмотреть ГОСТ 2068-43 на резины, так как резины типа РИ-3, для которых не представляется даже возможным нормировать значение $\text{tg}\delta$ после 24-часового пребывания в воде, не могут рассматриваться как электроизоляционные.

В связи с тем, что установочные провода часто работают в тяжелых условиях, за последние годы в мировой технике много сделано по улучшению качества проводов типа ПР-500. К сожалению, эта работа до сих пор не получила должного отражения в нашей практике. Работа велась в направлении повышения нагревостойкости и влагостойкости изоляции и защитных покрытий. В обоих этих направлениях достигнуты

серьезные результаты. Незадолго перед войной в Советском Союзе была разработана рецептура нагревостойких электроизоляционных резин, однако внедрение ее остановилось на полпути. На основе ряда испытаний, проведенных на заводе «Севкабель» и в ВЭИ, было признано возможным допустить для проводов с нагревостойкой резиновой изоляцией максимальную рабочую температуру 65° С.

К сожалению, и это половинчатое решение было обесценено затем стандартом ГОСТ 1977-43, который допускает применение для проводов одних и тех же марок как нагревостойкой, так и нормальной резиновой изоляции без всякой разницы в маркировке. Сейчас, когда у нас имеется полная возможность доработать рецептуру нагревостойких резин, необходимо добиться того, чтобы в ближайшее время провода марки ПР-500 выпускались с нагревостойкой резиновой изоляцией, допускающей рабочую температуру 75° С.

Провода, прокладываемые в трубах под штукатуркой или по стенам и, в особенности, в каналах и фундаментах, часто подвергаются сильному воздействию влаги. Наши нормальные установочные провода марки ПР-500, ПРГ-500 и ПРТО-1 000 не могут длительно работать в таких условиях. Это в значительной мере объясняется тем, что практически не контролируется влагостойкость применяемых для установочных проводов резин. У хороших электроизоляционных резин в сухом виде $\text{tg}\delta$ равен $0,02 \div 0,03$. ГОСТ 2068-43 допускает для резин РИ-2 и РТИ-2 увеличение $\text{tg}\delta$ уже через 24 часа пребывания в воде до 0,2. Этому требованию может удовлетворить самая посредственная электроизоляционная резина. Нельзя назвать влагостойкими и резины РИ-2 и РТИ-2.

В нормах отдельных стран на установочные провода с нагревостойкой резиновой изоляцией уже в 1937 г. были введены значительно более жесткие требования к влагостойкости; именно, диэлектрическая проницаемость после 14 дней погружения в воду при комнатной температуре не должна превышать 5. Приращение ϵ между концом 1-го дня и концом 14-го дня не должно превышать 20%, а приращение между концом 7-го и концом 14-го дня—5%.

Обследование, проведенное на заводе «Севкабель» еще в 1938 г., показало, что эти требования могут быть выдержаны при правильном подборе наполнителей и других ингредиентов резиновых смесей. На рис. 1 и 2 приведены для ряда производственных резин графики зависимости ϵ и $\text{tg}\delta$ от времени вымачивания в воде при 24° С. Кривые 1 относятся к резине для горячих прессов, содержащей 50% жидкофазного СК-Б со щелочностью порядка 1,2%, кривые 2—к резине для холодных прессов, содержащей 50% газофазного СК-Б со щелочностью порядка 0,4%, с каолином в качестве основного наполнителя, и кривые 3—к той же резине для холодных прессов, но на тальке. Как видно, первые две резины не удовлетворяют, а резина на тальке

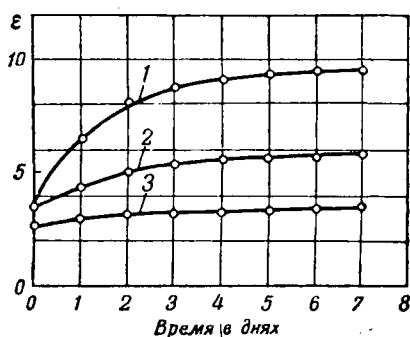


Рис. 1.

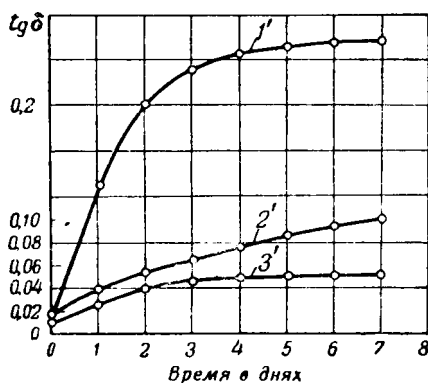


Рис. 2.

полностью удовлетворяет требованиям по влагостойкости.

Отсюда следует, что и в нашей практике могут быть предъявлены более жесткие требования к изоляции ответственных установочных проводов.

Уже давно разработаны влагостойкие сорта электроизоляционных резин, у которых $\text{tg } \delta$ и ϵ почти не изменяются при длительном пребывании в горячей воде. Первоначально эти резины применялись лишь для изготовления различных специальных кабелей, предназначенных, главным образом, для подводных прокладок. Но уже перед войной эти резины начали применяться и для изготовления установочных проводов и контрольных кабелей.

При применении такой изоляции оказалось возможным прокладывать провода типа ПРТО в подземной бетонной канализации, а контрольные кабели без свинцовой оболочки—даже под землей. Эффект, который дает применение влагостойкой резиновой изоляции, настолько существенен, что и на наших заводах следует начать работать над внедрением влагостойкой изоляции в массовое производство.

Одновременно с улучшением свойств резиновой изоляции необходимо также серьезно улучшить и свойства защитного покрова. ГОСТ 1977-43 предъявляет лишь самые минимальные требования к качеству составов, применяемых для пропитки оплеток: пропитанная оплетка не

должна быть маркой и липкой, а пропиточный состав должен обладать противогнилостными свойствами. К выбору рецептуры пропиточных составов у нас подходят не столько из эксплуатационных, сколько из технологических соображений. Для того, чтобы облегчить пропитку и сделать ее возможной при высоких скоростях движения провода через ванну, в состав вводится до 40% плавней (парафин, озокерит и пр.). При применении таких составов пропитка получается часто довольно бедной; на поверхности готового провода отчетливо видны нити оплетки и состав не заполняет полностью зазоры между отдельными прядями пряжи, а иногда из оплетки даже выступают ворсинки пряжи. При нагревании провода выше 50°C такой состав сильно размягчается.

Рассмотрение хорошо выполненных образцов установочных проводов показывает, что у них не только совершенно заполнены пропиточным составом все зазоры между прядями пряжи, но и поверх оплетки имеется сплошной, ровный, тонкий и вместе с тем очень прочный слой пропиточного состава.

В некоторых технических условиях, известных из литературы, на установочные провода введены серьезные требования к качеству пропитки оплеток. В частности, пропиточный состав не должен вытекать из оплетки после нагрева в течение 1 часа при температуре в 82°C ; оплетка при пребывании в воде в течение 72 часов должна увеличивать свой вес не больше чем на 15%.

Чтобы удовлетворить этим требованиям, нужно радикально изменить рецептуру пропиточных составов и технологию пропитки, что выполнимо лишь при условии установки нового оборудования и расширения производственных площадей. Однако, для улучшения качества проводов необходимо идти и на это.

Провода типа ПРД будут изготавливаться во все меньшем и меньшем количестве. В нашей практике прокладка на роликах пока еще сохраняется для внутренней прокладки, в особенности в деревянных зданиях. Однако, доля провода ПРД в общем выпуске установочных проводов будет постепенно сокращаться.

Незадолго перед войной одна американская фирма широко рекламировала провода, у которых защитный покров из хлопчатобумажной пряжи, пропитанный битуминозным составом, заменяется тонким слоем резины на основе неопрена. Однако, эта реконструкция не получила в США широкого применения. Наш собственный опыт показывает, что тонкий слой неопреновой или сопреновой резины далеко не эквивалентен по своим механическим свойствам хлопчатобумажной оплетке; изоляция таких проводов легко повреждается. Поэтому провода такого типа могут быть допущены лишь в специальных случаях, когда на первое место выдвигаются, например, требования к повышенной «маслостойкости» или «озоностойкости» провода, и при условии прокладки в трубах.

Значительно большего внимания заслуживает вторая новая конструкция установочных проводов, появившаяся незадолго перед войной. В этих проводах резиновая изоляция и защитный покров заменены одним слоем пластмассы на основе полихлорвинила. В 1940 г. были выпущены нормы, которые допускают применение проводов сечением до 16 мм² включительно с полихлорвиниловой изоляцией на напряжение до 600 В для применения наравне с нормальными установочными проводами. Для проводов с полихлорвиниловой изоляцией разработаны специальные нормы нагрузки и правила прокладки [Л. 2].

Испытание этих проводов с влагостойкой полихлорвиниловой изоляцией в воде при температуре в 50°С в течение 6 месяцев показало, что электрические характеристики изоляции остаются стабильными.

Полихлорвиниловая изоляция обладает высокой «маслостойкостью» и «озоностойкостью», не горюча и имеет хорошие механические свойства, достаточную твердость и красивый внешний вид, вследствие чего не нуждается в дополнительном защитном покрове. Сорты полихлорвинилового пластика, изготавливаемые сейчас нашей химической промышленностью, имеют тот недостаток, что у них довольно сильно ухудшаются электрические характеристики при нагревании [Л. 1]. Однако, этот недостаток вполне преодолим; пластикаты, известные сейчас, имеют температурный ход $\tan \delta$ и ϵ , мало отличающийся от аналогичных характеристик высококачественных резин [Л. 3].

При переходе на полихлорвиниловую изоляцию сильно сокращается технополический процесс изготовления проводов, ибо отпадает необходимость вулканизации, оплетки и пропитки. Поэтому и нам следует встать на путь смелого внедрения полихлорвиниловой изоляции не только для проводов слабого тока, как предполагалось вначале, но и для установочных проводов сильного тока, причем выпуск этих проводов надо организовать на всех заводах, выпускающих установочные провода, а не только на одном специализированном заводе. На первый период, учитывая указанный выше недостаток пластика, изготавливаемого нашей химической промышленностью, рационально начать выпуск проводов с полихлорвиниловой изоляцией с осветительных проводов ПРД малых сечений, которые обычно работают с небольшой нагрузкой.

Установочные провода для непосредственной прокладки по стенам и под штукатуркой. Большое значение приобретают легкие провода различных конструкций, допускающие непосредственную прокладку как по стенам, так и под штукатуркой. Сортамент изделий этой группы, выпускаемых у нас, очень беден и представлен только кабелями марки СРГ, которые допущены к прокладке по стенам в помещении всех типов (за исключением взрывоопасных) и выпускаются в значительных количествах.

Кабели марки СРГ обладают рядом существенных недостатков. Тонкая свинцовая оболочка их легко повреждается как при транспорте и монтаже, так и во время эксплуатации. Вместе с тем наличие свинцовой оболочки сильно утяжеляет и удорожает кабель. Трубчатые провода Куло (марка ТПРФ) изготавливались у нас до войны в незначительных количествах и применялись, главным образом, для специальных целей (оборудование вагонов).

В мировой технике кабели типа СРГ выходят из употребления и заменяются более легкими и надежными конструкциями. Например, кабели этого типа с голыми свинцовыми оболочками исключены из некоторых норм. Для непосредственной прокладки по стенам внутри помещений применяются в больших количествах провода ТПРФ, причем за последние годы конструкция их подверглась существенным изменениям, чтобы облегчить транспорт и монтаж. Вместо жесткой оболочки из стальной ленты начали применять оболочки из более мягких металлов (цинк, алюминий). Налажен выпуск проводов, у которых металлическая трубка еще на заводе делается рифленой.

Для прокладки в сырых местах разработана конструкция проводов, у которых поверх скрученных жил вместо бумажного заполнения и обмотки бумагой накладывается тонкая оболочка из суррогатной резины (смесь битума и регенератора). Стоимость такой влагостойкой конструкции превышает стоимость нормальной конструкции лишь на 10%, почему влагостойкая конструкция рекомендуется для широкого применения.

Для особо тяжелых условий прокладки, при наличии возможности химических воздействий, разработана конструкция проводов на 500 В, у которых поверх металлической оболочки накладывается антикоррозионная защита, состоящая из двух и более слоев пропитанной бумаги и двух слоев вязкого состава и хлопчатобумажной оплетки, пропитанной битуминозным составом.

Технология изготовления таких трубчатых проводов несложна. Известно, что в мировой технике уже в течение нескольких десятков лет успешно применяются для непосредственной прокладки по стенам провода, у которых свинцовая оболочка заменена резиновой шланговой оболочкой. Перед самой войной в ряде стран начали применяться для непосредственной прокладки по стенам провода, у которых свинцовая оболочка заменена оболочкой из полихлорвинилового пластика. Испытания этих проводов и результаты их опытной эксплуатации показывают, что оболочка из пластмасс даже превосходит по своему защитному действию свинцовую оболочку, так как она лучше выдерживает удары и порезы и не требует дополнительной антикоррозионной защиты. Оболочки из пластмасс имеют также ряд серьезных преимуществ и по сравнению с резиновыми оболочками [Л. 4].

Из изложенного выше следует, что кабели марки СРГ должны быть сняты с производства и заменены проводами новых конструкций. Воп-

рос о том, какой из разобранных выше новых конструкций для непосредственной прокладки по стенам следует отдать предпочтение в настоящий момент, требуется обсудить. Преимущества трубчатых проводов очевидны, и массовое производство их сейчас было бы нетрудно организовать, так как в нашем распоряжении имеется необходимое для этого оборудование, но одновременно нужно организовать производство соответствующей арматуры и монтажного инструмента.

Провода с оболочкой из пластмасс будут стоить дороже, чем провода Куло, но значительно надежнее их. Наиболее правильным решением вопроса будет, повидимому, организация одновременного производства обоих типов проводов.

Вопрос о необходимости создания конструкций кабелей, пригодных для непосредственной прокладки под штукатуркой, возник в связи с тем, что при прокладке проводов как в газовых трубах, так и в резиновых трубках приходится прорубать в стенах глубокие борозды и расходовать на прокладку много вспомогательных материалов. Кроме того, протаскивание проводов в трубы представляет собой трудоемкую опера-

цию, в процессе которой возможны повреждения провода.

Заключение. Из изложенного выше видна необходимость улучшения качества установочных проводов. Организация выпуска установочных проводов новых конструкций должна дать огромный экономический эффект. Для того, чтобы быстро преодолеть отставание, имеющееся в этой области, и найти наиболее правильное решение всех вопросов, которые возникнут при разработке и внедрении новых конструкций, необходима совместная работа кабельной промышленности, научно-исследовательских учреждений и организаций, потребляющих и эксплуатирующих установочные провода.

Литература

1. Н. Ф. Козырев. Хлорвиниловая изоляция. Труды Всесоюзной технической конференции НКЭП по применению новых материалов и заменителей, вып. IV, стр. 8—19, 1945.
2. Rolston. Synthetic Insulation and Jacket compound. Wire a. Wire Prod. т. 19, № 10, 1944.
3. Fowles. The Properties and Uses of Vinyl Resins for Wires and Cables. Wire a. Wire Prod., т. 18, 1943.
4. Berger. Neuere Erfahrungen mit Kunststoffisolierten bzw. ummantelten Leitungen und Kabel. ETZ, № 5, 1940.



Параметры систем прямолинейных и криволинейных проводов

Инж. Л. А. ЦЕЙТЛИН

Ленинград

Введение. Одной из основных задач, возникающих при расчете электрических цепей и исследований происходящих в них физических процессов, является определение параметров этих цепей—сопротивлений, емкостей и коэффициентов самоиндукции и взаимной индукции. Всякая электрическая цепь всегда включает в себя провода, влияние которых на режим работы цепи может быть весьма заметным; в отдельных случаях провода составляют основную, наиболее существенную часть электрической цепи (линии передачи, антенны и т. п.). Поэтому определение параметров сложных систем проводов представляет значительный интерес.

Настоящая статья посвящена методам расчета коэффициентов электромагнитной индукции и емкости сложных систем прямолинейных и криволинейных проводов, а также собственных и взаимных сопротивлений электродов, каждый из которых представляет такую систему. Методы расчета всех упомянутых величин имеют много общего и приводят к весьма сходным по форме результатам. Их совместное рассмотрение представляется поэтому весьма целесообразным.

Мы будем рассматривать только системы «линейных» проводов, т. е. системы, состоящие из проводов, длина и взаимные расстояния которых достаточно велики по сравнению с линейными размерами их поперечных сечений.

Общие соотношения. Коэффициенты самоиндукции и взаимной индукции сложных контуров. Общие выражения для коэффициентов самоиндукции и взаимной индукции контуров любой формы имеют вид:

$$L = \frac{\mu}{i^2} \int_V \int_V \frac{\vec{j} \vec{j}'' dV dV''}{R}, \quad (1)$$

$$M = \frac{\mu}{i_1 i_2} \int_{V_1} \int_{V_2} \frac{\vec{j} \vec{j}'' dV' dV''}{R}. \quad (2)$$

Излагаются общие методы расчета основных параметров сложных систем прямолинейных и криволинейных проводов. Приводятся общие выражения для коэффициента самоиндукции, собственной емкости и собственного сопротивления криволинейных проводов.

где i, i_1, i_2 — токи в рассматриваемых контурах;

μ — магнитная проницаемость,

предполагаемая одинаковой для проводов и окружающей их среды;

\vec{j} и \vec{j}'' — векторы плотности тока, соответствующие элементам объема dV' и dV'' ;

R — расстояние между dV' и dV'' , причем в выражении для L интегрирование оба раза производится по объему V рассматриваемого контура, а в выражении для M — сначала по объему V_1 одного контура, а затем по объему V_2 другого контура.

Задача расчета коэффициентов электромагнитной индукции заключается в интегрировании выражений (1) и (2) при заданной форме контуров.

Когда сложные контуры можно разбить на участки, имеющие сравнительно простую форму (например, на прямолинейные участки), определение коэффициентов индукции контуров целесообразно свести к определению коэффициентов индукции отдельных их участков. Пусть контур состоит из n участков. Тогда, представляя каждый из интегралов, входящих в (1), в виде суммы интегралов по объемам отдельных участков, найдем:

$$L = \sum_{k=1}^n L_{kk} + \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n L_{ki} (k \neq i), \quad (3)$$

где

$$L_{kk} = \frac{\mu}{i^2} \int_{V_k} \int_{V_k} \frac{\vec{j} \vec{j}'' dV' dV''}{R}, \quad (4)$$

$$L_{ki} = \frac{\mu}{i^2} \int_{V_k} \int_{V_i} \frac{\vec{j} \vec{j}'' dV' dV''}{R}. \quad (5)$$

Точно так же для коэффициента взаимной индукции двух контуров можно написать:

$$M = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m L_{ki}, \quad (6)$$

где n и m — числа участков, на которые разбиты контуры, причем индексы k и i относятся к участкам разных контуров.

Собственная и взаимная емкости систем проводов. Собственная емкость C системы и взаимная емкость C_{AB} двух систем A и B определяются выражениями:

$$C = \frac{q}{U}, \quad C_{AB} = \frac{q}{U_A - U_B}, \quad (7)$$

где U — потенциал уединенной системы, создаваемый ее зарядом q ;

U_A и U_B — результирующие потенциалы систем A и B при $q_A = -q_B = q$.

Таким образом, определение собственной и взаимной емкости систем сводится к определению их потенциалов при заданных зарядах. Точное решение этой задачи для проводников сложной формы в большинстве случаев невозможно из-за трудностей, связанных с неравномерностью распределения электричества по поверхности проводника. Достаточно точное решение может быть получено, если, следуя Хоу, допустить равномерное распределение электричества и, определив при этом условии среднее значение потенциала проводника, принять его за истинное. Этим методом мы и будем пользоваться.

Среднее значение потенциала, возбуждаемого на поверхности проводника зарядом, равномерно распределенным по его поверхности, равно

$$U = \frac{\sigma}{\epsilon s} \iint_{s \ s'} \frac{ds' ds''}{R},$$

где σ — поверхностная плотность заряда;

ϵ — диэлектрическая проницаемость окружающей среды;

s — поверхность проводника;

ds' и ds'' — элементы поверхности s ;

R — расстояние между ds' и ds'' .

Пусть проводник представляет собой систему из n проводов, сечения которых мы будем считать одинаковыми. Обозначим периметр сечения проводов через λ , длину, поверхность и заряд каждого провода через l , s и q с соответствующими индексами и общую длину проводов всей системы через L . Тогда, представив каждый из интегралов в выражении для U в виде суммы интегралов по поверхностям отдельных проводников, найдем:

$$\left. \begin{aligned} U &= \sum_{k=1}^n \frac{l_k}{l} U_k \\ U_k &= U_{kk} + \sum_{i=1}^n U_{ki} = a_{kk} q_k + \sum_{i=1}^n a_{ki} q_i (k \neq i), \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где U_k , U_{kk} и U_{ki} — соответственно средний потенциал k -го провода и его составляющие, обусловленные заря-

дами q_k и q_i , а потенциальные коэффициенты a_{kk} и a_{ki} определяются выражениями:

$$a_{kk} = \frac{1}{\epsilon l_k^2 \lambda^2} \iint_{s_k s_k} \frac{ds' ds''}{R}, \quad (9)$$

$$a_{ki} = \frac{1}{\epsilon l_k l_i \lambda^2} \iint_{s_k s_i} \frac{ds' ds''}{R}. \quad (10)$$

Если мы имеем две системы проводников, то для среднего потенциала U_{AB} возбуждаемого в системе A зарядом, равномерно распределенным по поверхности системы B , аналогично предыдущему найдем:

$$\begin{aligned} U_{AB} &= \sum_{k=1}^n \frac{l_k}{l_A} U_k = \sum_{k=1}^n \frac{l_k}{l_A} \sum_{i=1}^m U_{ki} = \\ &= \sum_{k=1}^n \frac{l_k}{l_A} \sum_{i=1}^m a_{ki} q_i, \end{aligned} \quad (11)$$

где l_A — общая длина проводов системы;

$U_{ki} = a_{ki} q_i$ — средний потенциал k -го провода системы A , возбуждаемый зарядом q_i i -го провода системы B , причем a_{ki} определяется согласно (10).

В силу формулы (7), с одной стороны, и формул (8) и (11), с другой, вычисление собственных и взаимных емкостей систем сводится к вычислению потенциальных коэффициентов a_{kk} и a_{ki} отдельных проводов.

Заметим, что $a_{ki} = a_{ik}$ и что для средних потенциалов справедлив принцип взаимности, согласно которому при одинаковых зарядах проводов (k , i) или систем (A , B) мы имеем: $U_{ki} = U_{ik}$, $U_{AB} = U_{BA}$.

Обращаясь к случаю систем проводов разного сечения, заметим, что если попрежнему считать поверхностную плотность заряда σ одинаковой для всех проводов, то метод расчета останется без изменения. Однако, в этом случае действительное распределение заряда по поверхности не всегда можно считать хотя бы приблизительно равномерным и предположение о равномерности распределения заряда может привести к недопустимо большим ошибкам. При наличии в системе проводов различного сечения следует отказаться от формального применения метода Хоу и производить расчет, исходя из одинаковой для всех проводов линейной, а не поверхностной плотности зарядов [Л.1]. При этом существенные изменения претерпевают лишь формулы (8) и (11), в которые вместо отношений l_k/l и l_k/l_A необходимо ввести отношения s_k/s и s_k/s_A , где s и s_A — полные поверхности проводов соответствующих систем.

Все вышеизложенное относится к системам, расположенным в однородной среде. Заметим, что весьма важный для практики случай систем, расположенных в воздухе вблизи поверхности земли, с помощью метода зеркальных изображений приводится к рассмотренному нами случаю однородной среды.

Собственное и взаимное сопротивление электродов, расположенных в проводящей среде. Собственным сопротивлением уединенного электрода, расположенного в проводящей среде, называют отношение потенциала электрода к силе выходящего из него тока:

$$R = \frac{U}{I}. \quad (12)$$

Взаимным сопротивлением двух электродов, расположенных в проводящей среде, называют отношение разности потенциалов электродов к силе тока, проходящего от одного из них к другому:

$$R_{AB} = \frac{U_A - U_B}{I}. \quad (13)$$

Приведенные определения имеют смысл лишь в том случае, когда потенциал имеет одинаковое значение во всех точках поверхности каждого электрода, т. е. когда вектор напряженности электрического поля в проводящей среде, окружающей электроды, перпендикулярен к поверхностям электродов. Это условие будет выполнено с достаточной степенью точности, если удельная проводимость вещества электродов значительно превосходит удельную проводимость окружающей среды. Для металлических электродов, погруженных в землю, а также для электродов, пространство между которыми заполнено одним из обычно применяемых в электротехнике изолирующих веществ, указанное соотношение выполняется с большой степенью точности.

Собственное сопротивление тела, расположенного в однородной проводящей среде, связано с собственной емкостью того же тела, расположенного в однородной изолирующей среде, соотношением:

$$CR = \frac{\varepsilon \rho}{4\pi}, \quad (14)$$

где ε — диэлектрическая проницаемость изолирующей среды;
 ρ — удельное сопротивление проводящей среды, окружающей тело.

Точно так же

$$C_{AB} R_{AB} = \frac{\varepsilon \rho}{4\pi}. \quad (15)$$

Таким образом, определение собственного и взаимного сопротивлений электродов может быть сведено к определению собственной и взаимной емкости тех же тел, и если последняя задача решена, то необходимость в специальном решении первой задачи отпадает.

Заметим также, что важный для практики случай электродов, расположенных в земле вблизи от ее поверхности, с помощью метода зеркальных изображений приводится к рассмотренному нами случаю однородной среды.

Параметры отдельных участков. Обице замечания. Формулы (3), (6), (8), (11), (14) и (15) сводят определение интересующих нас параметров сложных систем к определению коэффициентов электромагнитной индукции и потенциальных коэффициентов отдельных участков. К выводу выражений для этих коэффициентов мы теперь и переходим.

Существенно отметить, что исходные выражения (9) и (10) для α_{kk} и α_k , по своей структуре весьма близки к исходным выражениям (4) и (5) для L_{kk} и L_{kl} . Это дает возможность использовать при определении коэффициентов L и α одинаковые методы расчета.

Если системы состоят только из прямолинейных проводов, то для определения всех интересующих нас параметров систем при любой их конфигурации достаточно знать общие выражения коэффициента самоиндукции L_{kk} и потенциального коэффициента α_{kk} прямолинейного провода, а также коэффициента взаимной индукции L_{kl} и потенциального коэффициента α_{kl} двух таких проводов при произвольном взаимном расположении их в пространстве¹. На рассмотрении этого случая мы и остановимся в первую очередь.

Коэффициенты электромагнитной индукции прямолинейных проводов Рассмотрим прямолинейный провод произвольного, но постоянного по длине сечения (рис. 1). Представим элементы объема, входящие в (4), в виде

$$dV' = dS' dl' \text{ и } dV'' = dS'' dl'',$$

где dl' и dl'' — элементы длины двух каких-нибудь нитей тока l' и l'' ;

dS' и dS'' — соответствующие элементы площади S_k поперечного сечения провода.

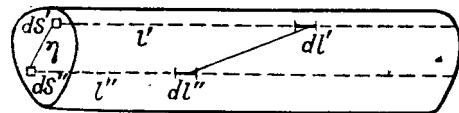


Рис. 1.

Тогда учитывая, что векторы \vec{j}' и \vec{j}'' в рассматриваемом случае совпадают по направлению, можем написать:

$$L_{kk} = \frac{1}{i^2} \iint_{S_k S_k} \vec{j}' \vec{j}'' M dS' dS'', \quad (16)$$

где

$$M = \mu \iint_0^{l_k} \frac{dl' dl''}{R} \quad (17)$$

есть коэффициент взаимной индукции нитей l' и l'' , равный

$$M = 2\mu l_k (\ln 2l_k - 1) - 2\mu l_k \ln r_l + 2\mu \eta - \mu \frac{r_l^2}{2l_k}, \quad (18)$$

где η — кратчайшее расстояние между нитями.

Подставив (18) в (16), получаем:

$$L_{kk} = N - G + A - Q, \quad (19)$$

где

$$N = 2\mu l_k (\ln 2l_k - 1), \quad (20)$$

$$G = \frac{2\mu l_k}{i^2} \iint_{S_k S_k} j' j'' \ln \eta dS' dS'', \quad (21)$$

$$A = \frac{2\mu}{i^2} \iint_{S_k S_k} j' j'' \eta dS' dS'', \quad (22)$$

$$Q = \frac{\mu}{2l_k i^2} \iint_{S_k S_k} j' j'' \eta^2 dS' dS''. \quad (23)$$

¹ Ниже мы покажем, что число необходимых выражений может быть уменьшено до двух.

Величины G , A и Q зависят от формы и размеров поперечного сечения провода и от характера распределения тока по сечению. При постоянном токе $j' = j'' =$

$$= \frac{i}{S_k} \text{ и}$$

$$G = 2\mu I_k \ln g, A = 2\mu a, Q = \frac{\mu}{2I_k} q^2, \quad (24)$$

где g , a и q — соответственно среднее геометрическое, среднее арифметическое и среднее квадратичное расстояния площади поперечного сечения провода от самой себя.

Так как определение g , a и q для простых фигур не встречает никаких затруднений, то вычисление коэффициента самоиндукции прямолинейного провода при постоянном токе может быть доведено до конца для всех форм поперечного сечения, представляющих практический интерес. Выражения (24) применимы и при переменном токе, если распределение тока по сечению можно считать равномерным, что обычно допустимо при промышленной частоте. Напротив, при достаточно высокой частоте ток будет распределен по сечению резко неравномерно и вычисление G , A и Q по формулам (21), (22) и (23) связано со значительными трудностями. Не ставя своей задачей общее рассмотрение этого вопроса, выходящего за рамки настоящей работы, мы остановимся лишь на двух особых случаях.

При весьма высокой частоте ток можно считать сосредоточенным лишь в весьма тонком слое вблизи поверхности проводника. Если сечение проводника имеет такую форму, при которой величина $di/d\lambda$ приблизительно постоянна по всему периметру сечения, то $j dS =$

$di = \frac{di}{d\lambda} d\lambda = \frac{i}{\lambda} d\lambda$ и формулы (21), (22), (23) снова переходят в (24), где под g , a и q теперь следует понимать среднее геометрическое, среднее арифметическое и среднее квадратичное расстояния периметра поперечного сечения от самого себя.

Рассмотрим теперь наиболее важный случай провода круглого сечения. Будем предполагать, что провод расположен в воздухе, и временно сохраним предположение о равенстве магнитных проницаемостей провода и окружающей среды. Тогда при равномерном распределении тока по сечению, учтя, что для круга радиуса r

$$\ln g = \ln r - \frac{1}{4}, \quad a = \frac{128}{45\pi} r, \quad q = r,$$

найдем:

$$G_0 = 2\mu_0 I_k \left(\ln r - \frac{1}{4} \right), \quad A_0 = 2\mu_0 \frac{128}{45\pi} r, \\ Q_0 = \frac{\mu_0}{2I_k} r^2.$$

При достаточно высокой частоте, подставив в (24) значения g , a и q для окружности, а именно: $g = r$, $a = \frac{4}{\pi} r$, $q = \sqrt{2}r$, найдем:

$$G_\infty = 2\mu_0 I_k \ln r, \quad A_\infty = 2\mu_0 \frac{4}{\pi} r, \quad Q_\infty = \frac{\mu_0}{2I_k} 2r^2.$$

Разности $G_\infty - G_0$, $A_\infty - A_0$, $Q_\infty - Q_0$ представляют собой, очевидно, составляющие коэффициента самоиндукции провода, обусловленные при постоянном токе магнитным потоком внутри провода. С другой стороны, для "линейных" проводов изменение коэффициента самоиндукции провода, обусловленное скин-эффектом, с достаточной степенью точности может быть определено так же, как и для бесконечно длинного уединенного провода. Поэтому при любой частоте и при $\mu \neq \mu_0$ можно написать:

$$G = 2\mu_0 I_k \left(\ln r - \frac{\mu}{\mu_0} \frac{\xi}{4} \right), \\ A = \frac{2\mu_0}{\pi} \left(4 - \frac{\mu}{\mu_0} \frac{52}{45} \xi \right) r, \\ Q = \frac{\mu_0}{2I_k} \left(2 - \frac{\mu}{\mu_0} \xi \right) r^2,$$

где

$$\xi = \frac{4}{\pi} \frac{\text{ber } kr \text{ ber}' kr + \text{bei } kr \text{ bei}' kr}{\text{ber}^2 kr + \text{bei}^2 kr},$$

причем $k^2 = 4\pi\gamma\omega$;

γ — удельная проводимость вещества провода;

ω — угловая частота переменного тока;

$\text{ber } kr$ и $\text{bei } kr$ — вещественная и мнимая составляющие бесселевой функции $J_0(kr\sqrt{-j})$ первого рода нулевого порядка от комплексного аргумента $(kr\sqrt{-j})$;

$\text{ber}' kr$, $\text{bei}' kr$ — производные от $\text{ber } kr$ и $\text{bei } kr$ по kr .

Перейдем к определению коэффициента взаимной индукции двух прямолинейных проводов в общем случае их взаимного расположения в пространстве. Так как мы рассматриваем лишь "линейные" провода, то общее выражение (5) для L_{ki} существенно упрощается. Представив подынтегральное выражение в виде:

$$\frac{j' j'' dS' dS''}{R} \frac{dl' dl''}{R}$$

и приняв во внимание, что результат интегрирования по l' и l'' можно считать одинаковым для любой пары нитей, получим:

$$L_{ki} = \iint_{k_i} \frac{dl' dl''}{R}. \quad (25)$$

Проведем две параллельные плоскости так, чтобы в каждой из них лежал один из рассматриваемых проводов (рис. 2). Обозначим расстояние между плоскостями через a , а угол между проводами через φ ($0 \leq \varphi \leq \pi$). Введем координаты x и y , отсчитываемые вдоль проводов от общего перпендикуляра к ним в направлении протекающих по ним токов. Тогда

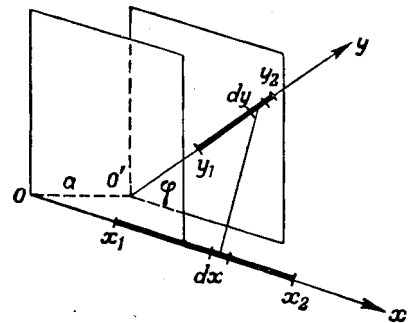


Рис. 2.

$dl' dl'' = dx dy \cos \varphi$, $R = \sqrt{x^2 + y^2 - 2xy \cos \varphi + a^2}$. Координаты x и y , соответствующие началам и концам проводов, обозначим через x_1, x_2, y_1, y_2 .

Интегрирование выражения (25), произведенное в одной из наших работ [1.3], дает:

$$L_{ki} = \mu \cos \varphi \sum_{p=1}^2 \sum_{q=1}^2 (-1)^{p+q} F_{pq}, \quad (26)$$

где

$$F_{pq} = x_p \ln(y_q - x_p \cos \varphi + R_{pq}) + y_q \ln(x_p - y_q \cos \varphi + R_{pq}) + \frac{2a}{\sin \varphi} \arctg \left(\frac{x_p + y_q + R_{pq}}{a} \tan \frac{\varphi}{2} \right), \quad (27)$$

$$R_{pq} = \sqrt{x_p^2 + y_q^2 - 2x_p y_q \cos \varphi + a^2},$$

причем значения арктангенса следует брать в пределах от 0 до $-\frac{\pi}{2}$ и от 0 до $\frac{\pi}{2}$.

Отметим, что формула (26) более проста и обща, чем известные формулы Мартенса, Кемпбелла и Хака [1.4, 5.6],

Из общего выражения (26) легко получить частные формулы для различных специальных случаев взаимного расположения проводов [Л. 3].

Потенциальные коэффициенты прямолинейных проводов. Потенциальные коэффициенты α_{kk} и α_{ki} могут быть определены по основным формулам (9) и (10). Однако, в случае прямолинейных проводов проще воспользоваться из этого общей зависимостью, которая может быть установлена между потенциальными коэффициентами проводов с одной стороны, и коэффициентами самоиндукции и взаимной индукции этих проводов, — с другой [Л. 1, 2].

Пусть мы имеем систему прямолинейных проводов и пусть частота тока в проводах настолько велика, что ток можно считать сосредоточенным только в весьма тонком слое вблизи поверхности проводника (рис. 3). Величину $d\lambda$ в этом слое будем считать одинаковой по всему периметру каждого из проводов. Тогда, пользуясь обозначениями рис. 3, имеем:

$$j = \frac{di}{b d\lambda} = \frac{i}{b\lambda}, \quad dV = bds, \quad jdV = \frac{i}{\lambda} ds.$$

Так как, кроме того, для прямолинейных проводов векторы \vec{j} и \vec{j}' в (4) совпадают по направлению, а в (5) составляют между собой угол, равный углу φ_{ki} между i -м и k -м проводами, то

$$L_{kk} = \frac{\mu}{\lambda^2} \iint_{s_k s_k} \frac{ds' ds''}{R}, \quad L_{ki} = \frac{\mu}{\lambda^2} \cos \varphi_{ki} \iint_{s_k s_i} \frac{ds' ds''}{R}, \quad (28)$$

где s_k и s_i — боковые поверхности соответствующих проводов.

Сравнивая выражения (9) и (10) с выражениями (28), находим:

$$\alpha_{kk} = \frac{v^2}{l_k^2} L_{kk}, \quad (29)$$

$$\alpha_{ki} = \frac{v^2}{l_k l_i} \frac{L_{ki}}{\cos \varphi_{ki}}, \quad (30)$$

где $v = 1/\sqrt{\mu\epsilon}$. Таким образом, потенциальный коэффициент α_{kk} прямолинейного провода пропорционален коэффициенту самоиндукции этого провода, определенному при условии равномерного распределения тока по его поверхности. Потенциальный коэффициент α_{ki} двух прямолинейных проводов пропорционален отношению коэффициента взаимной индукции этих проводов к косинусу угла между ними.

Полученные соотношения сводят определение потенциальных коэффициентов прямолинейных проводов к определению коэффициентов самоиндукции и взаимной индукции этих же проводов, т. е. к задаче, решение которой дано выше. Таким образом, необходимость в специальном выводе формул для потенциальных коэффициентов отпадает.

Отметим, что допущения, лежащие в основе метода Гюи, приводят при определении коэффициентов α_{kk} к погрешности не меньшей, чем величины порядка g/l , где l — длина провода; g — среднее геометрическое расстояние периметра его сечения от самого себя. Поэтому, определяя α_{kk} по формуле (29), можно в выражении для L_{kk} пренебречь величинами A и Q по сравнению с суммой первых двух членов, после чего получим:

$$\alpha_{kk} = \frac{v^2}{l_k^2} (N - G),$$

где N и G имеют прежние значения (20) и (24), причем G — среднее геометрическое расстояние периметра поперечного сечения провода от самого себя.

Для круглого провода радиуса r находим:

$$\alpha_{kk} = \frac{2}{\epsilon l_k} \left(\ln \frac{2l_k}{r} - 1 \right).$$

Подставляя значение L_{ki} из (26) в (30), имеем:

$$\alpha_{ki} = \frac{1}{\epsilon l_k l_i} \sum_{p=1}^2 \sum_{q=1}^2 (-1)^{p+q} F_{pq},$$

где F_{pq} попрежнему определяется формулой (27).

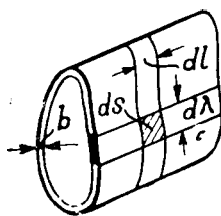


Рис. 3.

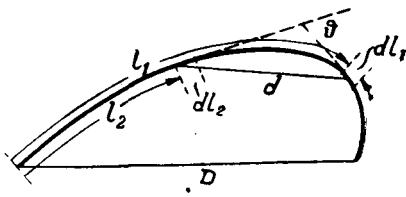


Рис. 4.

Коэффициенты электромагнитной индукции криволинейных проводов. Общие основания расчета коэффициентов электромагнитной индукции криволинейных проводов даны в работах автора [Л. 7, 8, 9].

Рассматривая криволинейный провод, ось которого изогнута по гладкой кривой, мы привели выражение для коэффициента самоиндукции этого провода к виду (19), где

$$N = 2v \int_0^{l_k} [W(l_1) - V(l_1, 0)] dl_1, \quad (31)$$

где l_1 и l_2 — криволинейные координаты, отсчитываемые вдоль оси провода (рис. 4) от одного из его концов;

$V(l_1, l_2)$ — функция, первообразная по отношению к функции $\frac{\cos \vartheta}{d}$ при перемен-

ной l_2 ;

ϑ и d — соответственно угол и расстояние между элементами длины dl_1 и dl_2 ;

$V(l_1, 0)$ — значение функции

$V(l_1, l_2)$ при $l_2 = 0$ и, наконец,

$$W(l_1) = \lim_{h \rightarrow 0} [V(l_1, l_1 - h) + \ln(2d_h)] \quad (32)$$

есть функция только от l_1 , причем d_h — хорда, стягивающая малую дугу h . Величины G и A имеют те же значения (21) и (22), что и для прямолинейного провода, а Q отличается от (23) только тем, что в знаменателе коэффициента перед двойным интегралом следует заменить l_k на D , где D — хорда, соединяющая концы оси провода.

Величина N , в отличие от G , A и Q , зависит только от формы и размеров оси провода и не зависит от формы и размеров поперечного сечения и от характера распределения тока по сечению. Таким образом, вычисление коэффициента самоиндукции криволинейного провода распадается на две самостоятельные задачи, из которых первая — вычисление N — имеет решение, определяемое независимо от формы сечения провода только уравнением его оси, а вторая — вычисление G , A и Q — решается одинаково для всех проводов с одинаковой формой сечения. Поэтому все сказанное выше относительно определения величин G , A и Q для прямолинейного провода остается в силе и для случая криволинейных проводов. Для провода, изогнутого по замкнутой кривой, как показывает исследование, в общей формуле (19) следует положить $A = Q = 0$. Величина N в формуле (31) еще не

выражена явно через геометрические размеры провода, и для каждой формы оси провода необходимо произвести двукратное интегрирование. В тех случаях, когда N не выражается в конечном виде через элементарные или табулированные функции, следует прибегнуть к численному интегрированию.

Погрешность формулы (19) не превосходит величин порядка $\left(\frac{g}{2\rho_m}\right)^2$, где g — среднее геометрическое расстояние площади поперечного сечения провода от самой себя; ρ_m — наименьший радиус кривизны оси провода.

При определении коэффициента взаимной индукции двух криволинейных проводов исходным выражением может служить формула (25), справедливая для любых „линейных“ проводов. В большинстве случаев интегрирование выражения (25) в конечном виде невозможно, и для определения L_{ki} следует прибегнуть к численному интегрированию или заменить каждую из рассматриваемых кривых ломаной линией, достаточно близко совпадающей с ней, после чего определение L_{ki} сведется к задаче, метод решения которой нами уже рассмотрен.

Потенциальные коэффициенты криволинейных проводов. Общее выражение для потенциального коэффициента α_{kk} криволинейного провода может быть получено таким же путем, каким было найдено выражение (19) для коэффициента самоиндукции криволинейного провода, и имеет вид:

$$\alpha_{kk} = N_a - G_a, \quad (33)$$

где

$$N_a = \frac{2}{\varepsilon l_k^2} \int_0^{l_k} [W(l_1) - V(l_1, 0)] dl_1, \quad (34)$$

$$G = \frac{2}{\varepsilon l_k} \ln g,$$

$V(l_1, l_2)$ — функция, первообразная по отношению к функции $1/d$ при переменной l_2 , а все прочие обозначения — те же, что и в формулах (31) и (32), причем g — среднее геометрическое расстояние периметра поперечного сечения провода от самого себя.

Величина N_a , в отличие от G_a , зависит только от формы и размеров оси провода и не зависит от формы и размеров поперечного сечения. Для определения N_a необходимо произвести двукратное интегрирование согласно выражению (34). Если интегрирование в конечном виде неосуществимо, то следует применить один из методов численного интегрирования.

Допущения, лежащие в основе метода Хоу, не дают возможности строго оценить погрешность формулы (33). Для незамкнутых проводов эта погрешность, вообще говоря, не ниже вели-

чин порядка g/l_k . Для замкнутых проводов, изогнутых по гладким кривым, распределение электричества по длине провода вследствие отсутствия концов, как правило, ближе к равномерному, чем в случае незамкнутых проводов, и погрешность при определении α_{kk} соответственно меньше. Так, например, для круглого кольца круглого сечения сравнение с точным выражением, найденным для этого случая Н. А. Булгаковым [Л. 10], показывает, что формула (33) дает α_{kk} с точностью до членов порядка $\left(\frac{r}{2R}\right)^2$, где r — радиус провода; R — радиус кольца.

При определении потенциального коэффициента α_{ki} двух криволинейных проводов, удовлетворяющих условию „линейности“, исходным выражением может служить формула:

$$\alpha_{ki} = \frac{1}{\varepsilon l_{ki}} \int_{l_k} \int_{l_i} \frac{dl' dl''}{R}, \quad (35)$$

легко получаемая из основной формулы (10), если заменить в ней ds на $dldl$ и принять во внимание, что в случае „линейных“ проводов результат интегрирования по l' и l'' можно считать одинаковым для любой пары кривых l' и l'' .

Считая своим долгом отметить, что статья написана мною по предложению проф. П. Л. Калантарова, который взял на себя труд просмотреть ее в рукописи и сделал ценные замечания.

Литература

1. Л. А. Цейтлин. Об определении среднего потенциала и емкости систем прямолинейных проводов. Труды Военной электротехнической краснознаменной академии связи им. Буденного, № 7, стр. 93, 1944.
2. F. W. Grover. Methods, Formulas and Tables for the Calculation of Antenna Capacity. Scientific Papers of the Bureau of standards, т. 22, № 568, стр. 569, 1928.
3. Л. А. Цейтлин. Труды Военной электротехнической краснознаменной академии связи им. Буденного, № 1944.
4. F. F. Martens. Über die gegenseitige Induktion und ponderomotorische Kraft zwischen zwei stromdurchflossenen Rechtecken. Annalen der Physik, т. 29, № 10, стр. 55, 1909.
5. G. A. Campbell. Mutual Inductances of Circuits Composed of Straight Wires. Phys. Rev., т. 5, № 6, стр. 45, 1915.
6. J. H. A. k. Gegeninduktivitäten und Kräfte zwischen geraden Strecken und Selbstinduktivität von regelmässigen Vierecken. A. f. E., т. 32, № 4, стр. 267, 1938.
7. Л. А. Цейтлин. Общие основания расчета коэффициентов самоиндукции криволинейных проводов. Электричество, № 7, стр. 52, 1946.
8. Л. А. Цейтлин. Общее выражение коэффициента самоиндукции криволинейного провода. Доклады Академии наук СССР, т. 54, № 1, стр. 31, 1946.
9. Л. А. Цейтлин. О максвелловом методе средних геометрических расстояний. Доклады Академии наук СССР, т. 54, № 2, стр. 135, 1946.
10. Н. А. Булгаков. Вычисление электроемкости кольца. Журнал Русского физико-химического общества, т. 30, № 3, Физический отдел, отдел первый, стр. 45, 1931.

Аппроксимирование кривой намагничивания

Доктор техн. наук, проф. Р. Л. АРОНОВ

Харьковский электротехнический институт

Современные задачи в области исследования машин и аппаратов часто включают в число связей кривую намагничивания. Премещение к аналитическому исследованию кон-

струкции, наиболее быстро ведущему к цели, требует применения формул, аппроксимирующих кривую намагничивания. Впервые предложил такую формулу Мюллер в 1850 г. [Л. 1], но она лишь отдаленно соответствовала положению вещей. С тех пор ежегодно, вплоть до последнего времени, появлялись новые работы в этой области.

В течение 100 лет было предложено много различных формул для аппроксимирования кривой намагничивания. После пробы применить простые функции, как-то: гиперболу, логарифм, экспоненту, гиперболические тангенс и синус, возникли более сложные формулы, комбинирующие названные функции. В 1945 г. Ридер [Л. 28] предложил новую формулу, содержащую функцию «гудермания».

Многие авторы изобразили кривую намагничивания в виде более или менее развернутой рациональной или иррациональной функции. Обзор этих работ дал Секвенц [Л. 11]. Сопоставлению формул и выбору наиболее удачной из них посвящены и другие работы [Л. 12, 25, 28, 32; в последней приведен перечень литературы с 1850 по 1946 г.].

Правильный выбор формулы играет большую роль для достижения поставленной цели и поэтому заслуживает детального рассмотрения.

В большинстве статей выбор обосновывается хорошим совпадением аналитической кривой с опытной кривой намагничивания материала или конструкции. Иногда это совпадение считается достаточным обоснованием [Л. 7, 8, 9]. Однако, при конструировании, производстве и эксплуатации машин и аппаратов, а также их деталей магнитные характеристики не остаются стабильными, а претерпевают изменения даже при сохранении геометрических размеров и, безусловно, модифицируются при варьировании элементов. Например, положительный или отрицательный остаточный магнетизм электрической машины может весьма сильно изменить протекание про-

Аналитическое исследование электрических машин и аппаратов требует применения формул, аппроксимирующих кривые намагничивания. На протяжении 100 лет этот вопрос не сходил со страниц технических журналов. Сформулированы требования к аналитическим выражениям для кривых намагничивания и на их основе рекомендованы новые модификации некоторых из ранее предложенных формул.

цессов управления, особенно в их начальной части. Поэтому специальные кривые или таблицы, базированные на универсальных кривых намагничивания в относительных

единицах [Л. 10 и 30], имеют весьма ограниченное применение для расчетов процессов управления.

Гартель [Л. 21] предъявляет к аппроксимирующей функции несовместимые в общем случае требования: немногочисленность параметров и хорошее совпадение с опытной кривой. Если это даже удается сделать для заданной кривой намагничивания, то степень точности совпадения будет утеряна при изменениях кривой.

Кривая намагничивания претерпевает большие модификации, как количественные, так и по своей форме, в зависимости от: а) материала, б) термической обработки, в) температуры, г) механических факторов, д) величины и направления намагничивания (частые и полные циклы гистерезиса), е) предшествующего магнитного состояния, ж) быстроты изменения м. д. с., з) конструкции магнитопровода, и) воздушных зазоров, немагнитных прокладок, положения якоря, к) наклепа и т. д.

Ридер [Л. 28] предъявляет два требования к уравнению кривой намагничивания: 1) функция должна быть нечетной; 2) производная от функции должна быть простого вида. Надо заметить, что первое требование возникает лишь для процессов, охватывающих начало координат, и справедливо лишь при пренебрежении остаточным магнетизмом. Таким образом, в ряде случаев оно нецелесообразно, а во многих и неправильно, особенно если большую роль играет остаточный магнетизм (самовозбуждение, гашение поля). Второе требование подразумевает, что зависимая переменная не входит непосредственно в дифференциальное уравнение, а лишь используется ее первая производная. Следовательно, это требование имеет смысл лишь для определенных методов решения ограниченного круга задач.

В качестве правильных критериев для выбора уравнения кривой намагничивания можно предложить следующие:

1. Число параметров в формуле должно быть достаточно для того, чтобы аппроксимировать с необходимым приближением участок кривой намагничивания, определяющий изучаемый процесс.

2. Формула должна легко приспособляться к изменениям кривой намагничивания в процессе эксплуатации или при варьировании конструкции.

3. Определение параметров должно быть нетрудоемким и выполняться без вспомогательных построений, специальных кривых или особых таблиц. Желательно иметь систему уравнений, определяющую параметры по контрольным точкам любого заданного отрезка опытной кривой, решаемую в общем виде относительно искомых параметров.

4. Число членов в формуле должно быть невелико, а ее использование не приводить к сложным вычислениям.

5. Уравнение кривой намагничивания должно быть решено относительно желаемой переменной. Если получение в явном виде обратной функции затруднительно, то для этого случая надо иметь соответственно другое уравнение, решенное относительно второй переменной.

6. Подстановка аналитической связи переменных в дифференциальное уравнение процесса намагничивания должна приводить его к интегрируемой форме для возможности аналитического исследования результата, так как в противном случае теряется основная цель аппроксимации.

Таким образом «удачность» формулы нельзя оценить по хорошему приближению к частному случаю кривой намагничивания; в значительной мере выбор зависит от изучаемого процесса. Для охвата широкого круга задач надо иметь набор формул, решенных как относительно одной, так и второй переменной, координированных с методикой расчета неустановившихся процессов.

Переходный процесс в цепи постоянного тока определяется уравнением:

$$2pw \frac{d\Phi}{dt} 10^{-8} + ri = E, \quad (1)$$

где $2p$ — число последовательно соединенных катушек;

w — число витков на полюсе;

Φ — поток;

r — активное сопротивление контура;

E — э. д. с.

В уравнении (1) независимой переменной является время, а в качестве зависимой можно выбрать i или Φ . Таким образом, существуют две формулировки решения:

$$t = 2pw \cdot 10^{-8} \cdot \int_{\Phi_n}^{\Phi} \frac{d\Phi}{E - rf(\Phi)}, \quad (2)$$

$$t = 2pw \cdot 10^{-8} \int_{i_n}^i \frac{\Psi'(i) di}{E - ri}. \quad (3)$$

При применении (2) аппроксимирующая формула должна быть решена относительно i , а для (3) нужна другая формула, решенная относительно Φ .

Требование интегрируемости (2) или (3) в общем виде сужает круг применимых формул, ибо при необходимости численного интегрирования сомнительна, как указывалось выше, польза от замены исходных связей аппроксимирующими функциями.

Для процессов самовозбуждения и самогашения поля электрических машин их э. д. с. E пропорциональна Φ . Выражение (2) приводится к легко интегрируемому виду формулой:

$$i = f(\Phi) = \alpha\Phi + \beta\Phi^{2n+1} + \gamma\Phi^{4n+1}. \quad (4)$$

При $n=1$ получаем из (4) формулу Бирманса [Л. 6]; при $\gamma=0$ — формулу Ружа [Л. 18], нашедшую многочисленные применения [Л. 19, 24, 27].

В общем случае рассматриваемая формула имеет четыре параметра, а указанные выше ее частные модификации — по три. Определение параметров, входящих линейно в (4), не представляет никаких затруднений за исключением того, что они сильно разнятся друг от друга порядком численных значений; определение показателя затруднительно, особенно для общего случая; учет остаточного магнетизма отсутствует.

Не останавливаясь на разборе многочисленных формул других авторов, перейдем к случаю, когда намагничивающие катушки машин или аппаратов включаются на постоянное напряжение U , заменяющее в предыдущих формулах E . При этом теряется интегрируемость в общем виде выражения (2), если пользоваться формулой (4) (за исключением $U=0$). Поэтому для задач этого типа ($U>0$ — независимое возбуждение, $U=0$ — гашение поля, $U<0$ — погашение поля) предложена автором новая модификация, имеющая четыре параметра:

$$i = f(\Phi) = k(\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_0), \quad (5)$$

где

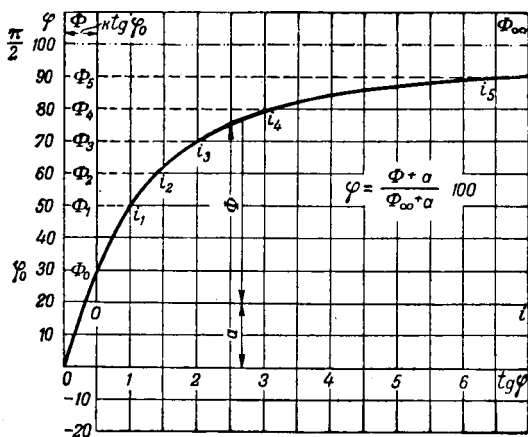
$$\varphi = \frac{\Phi + a}{\Phi_\infty + a} \cdot \frac{\pi}{2} \text{ и } \varphi_0 = \frac{\Phi_0 + a}{\Phi_\infty + a} \cdot \frac{\pi}{2}; \quad (6)$$

введенные параметры и их характер ясны из рисунка.

Уравнение (5) удовлетворяет всем изложенным выше критериям, а также допускает удобный учет остаточного магнетизма Φ_0 . Ток i можно заменить пропорциональной величиной n (ампервитки), поток Φ , аналогично, — индукцией B .

Для определения четырех параметров ($k, a, \Phi_\infty, \Phi_0$) выберем на заданном участке кривой намагничивания пять точек, отделенных одинаковыми интервалами потоков:

$$\begin{aligned} \varphi_5 - \varphi_4 &= \varphi_1 - \varphi_3 = \varphi_3 - \varphi_2 = \varphi_2 - \varphi_1, \\ \varphi_5 - \varphi_3 &= \varphi_3 - \varphi_1. \end{aligned} \quad (7)$$



Подстановка координат этих точек в уравнение (5), попарное вычитание для исключения φ_0 и попарное деление полученных выражений для исключения k дают:

$$\frac{\cos \varphi_3}{\cos \varphi_1} = \frac{i_3 - i_1}{i_3 - i_2} = A_1; \quad \frac{\cos \varphi_3}{\cos \varphi_1} = \frac{i_3 - i_1}{i_5 - i_3} = A_2;$$

$$\frac{\cos \varphi_5}{\cos \varphi_3} = \frac{i_4 - i_3}{i_5 - i_4} = A_3. \quad (8)$$

Из трех уравнений системы (8) надлежит выбрать любые два для определения двух неизвестных, что допускает три варианта определения параметров. Это повышает возможность приспособления уравнения к различным вариациям кривой намагничивания. Например, первые два уравнения системы (8) дают следующие связи:

$$\cos \varphi_5 = A_2 \cos \varphi_1; \quad (9)$$

$$\cos^2 \varphi_3 = \cos^2 \frac{\varphi_5 + \varphi_1}{2} = \frac{1 + \cos(\varphi_5 + \varphi_1)}{2} =$$

$$= \frac{1}{2} (1 + \cos \varphi_5 \cdot \cos \varphi_1 - \sin \varphi_5 \cdot \sin \varphi_1) =$$

$$= A_1^2 \cos^2 \varphi_1. \quad (10)$$

Исключение φ_5 из (10) с помощью (9) приводит к решению:

$$\cos \varphi_1 = + \frac{1}{2A_1} \sqrt{\frac{4A_1^2 - (1 + A_2)^2}{A_1^2 - A_2}} \quad (11)$$

Уравнения (11) и (9) позволяют вычислить φ_1 и φ_5 и искомые параметры:

$$\alpha = \frac{\varphi_5 \varphi_1 - \varphi_1 \varphi_5}{\varphi_5 - \varphi_1}, \quad (12)$$

$$\Phi_\infty = \frac{\Phi_5 \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_1 \right) - \Phi_1 \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_5 \right)}{\varphi_5 - \varphi_1}. \quad (13)$$

Далее, находим:

$$k = \frac{i_5 - i_1}{\operatorname{tg} \varphi_5 - \operatorname{tg} \varphi_1}, \quad (14)$$

и, наконец, по уравнению (5) определяем φ_0 :

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = \operatorname{tg} \varphi_1 - \frac{i_1}{k} = \operatorname{tg} \varphi_5 - \frac{i_5}{k}. \quad (15)$$

Второй вариант определения параметров кривой намагничивания, по последним двум уравнениям системы (8), приводит к решениям, аналогичным приведенному; отличие от первой системы состоит лишь в замене коэффициента A_1 на $A_2 : A_3$.

Оба вышеприведенные варианта обеспечивают точное прохождение аналитической кривой через точки 1, 3 и 5. Так как φ_2 или, соответственно, φ_4 не входят в систему уравнений для определения параметров, то остающаяся одна координата четной точки не обеспечивает точного прохождения через нее аналитической кривой.

Третий вариант получается комбинированием первого и третьего уравнений (8) и приводит к замене в (9) и (11) коэффициента A_2 на $A_1 \cdot A_3$. Введение всех пяти координат i приводит к увеличению свободы выбора средней точки и поэтому аналитическая кривая проходит точно только через точки 1 и 5.

Определение параметров изложенным выше способом приводит к несложным вычислениям. Четыре параметра, три варианта их определения, свобода в выборе участка интерполяции и несвязанность с прохождением кривой через начало координат приводят почти во всех практических случаях к достаточной аппроксимации опытной кривой намагничивания.

В случае необходимости приближение можно улучшить известными методами средних величин или наименьших квадратов.

Так как в формулу (5) параметры входят нелинейно, указанные методы не позволяют определить их непосредственно, а дают лишь способ вычисления поправок к исходным значениям (например, Скарборо «Численные методы математического анализа», § 115). Формальное решение рекомендованными способами получить весьма легко, но пользование ими приводит к весьма трудоемким расчетам и при четырех параметрах практически уже невозможно. Так, при вычислении поправок по 10 точкам по методу наименьших квадратов и трехзначных исходных числах после возведения в квадрат и суммирования получаются семизначные. Решение нормальных уравнений приводит к вычислению пяти определителей четвертого порядка; 24 произведения из четырех сомножителей определяют результирующее значение каждого из пяти детерминантов. Так как вычисляются поправки к параметрам, а не их значения, то в знакопеременной сумме 24 членов получаются близкие по абсолютной величине числа, и для получения достаточно хорошего результата необходимо вычислить до восьми знаков в каждом. Если исходные значения каких-либо параметров близки к оптимальным, для определения поправок необходимы вычисления еще большего числа знаков суммируемых членов. Таким образом этот путь неприменим для инженерных расчетов.

В рассматриваемом случае можно предложить, как выход из затруднительного положения,

ния, последовательное уточнение параметров. Наибольшее значение имеет уточнение k . Этот параметр входит в формулу (5) линейно и поэтому может быть определен из нормального уравнения:

$$\Sigma (\operatorname{tg} \varphi_j - \operatorname{tg} \varphi_0)^2 k_1 = \Sigma i_{nj} (\operatorname{tg} \varphi_j - \operatorname{tg} \varphi_0). \quad (16)$$

Буквой n помечены наблюдаемые величины, а индекс j обозначает номер точки, для которой вычисляется поправка. Исходные значения параметров обозначены буквами без индексов, после первого исправления те же буквы получают индекс 1, второго — 2 и т. д.; в качестве символов поправок применены греческие буквы:

$$\alpha = k_1 - k; \beta = a_1 - a; \gamma = \Phi_{\infty 1} - \Phi_{\infty}; \delta = \Phi_{01} - \Phi_0; \mu_j = i_{nj} - i_j. \quad (17)$$

После введения в (16) исходных значений k согласно (5) получим:

$$\frac{k_1}{k} = \frac{\Sigma i_{nj} \cdot i_j}{\Sigma i_j^2}; \frac{\Delta k}{k} = \frac{\Sigma \mu_j i_j}{\Sigma i_j^2}. \quad (18)$$

Возможности уточнения можно расширить путем замены в (5) — $k \operatorname{tg} \varphi_0$ на c . Тогда два параметра входят в уравнение линейно и могут быть непосредственно определены по способу наименьших квадратов, затем уточнены исходные значения Φ_{∞} и a .

Нормальные уравнения напишутся так:

а) для определения k и c :

$$\Sigma \operatorname{tg}^2 \varphi_j \cdot k_2 + \Sigma \operatorname{tg} \varphi_j \cdot c = \Sigma i_{nj} \operatorname{tg} \varphi_j, \quad (19)$$

$$\Sigma \operatorname{tg} \varphi_j \cdot k_2 + \Sigma 1 \cdot c = \Sigma i_{nj}; \quad (20)$$

б) для уточнения Φ_{∞} и a :

$$\Sigma (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_j)^2 \beta' - \Sigma \varphi_j (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_j)^2 \gamma' = \Sigma \mu_j (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_j), \quad (21)$$

$$-\Sigma \varphi_j (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_j)^2 \beta' + \Sigma \varphi_j^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_j)^2 \gamma' = -\Sigma \mu_j \varphi_j (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_j), \quad (22)$$

где¹

$$\beta' = \frac{100k_2}{\Phi_{\infty} + a} \beta \text{ и } \gamma' = \frac{\beta + \gamma}{\Phi_{\infty} + a} k_2. \quad (23)$$

Решение систем (19) и (20) требует вычисления четырех сумм, систем (21) и (22), соответственно, — пяти. После этого вычисление k и c , а также β и γ не представляет труда.

В качестве примера рассмотрим аппроксимацию кривой намагничивания реле РЭ100 с немагнитной прокладкой толщиной 0,24 мм. Вычисления выполнены для координат m (ампервитки) и Φ (магнитный поток). По уравнениям (11).... (15) находим:

$$k = 319,6; a = -9,124; \Phi_{\infty} = 73\,377; \Phi_0 = 4\,098.$$

Согласно (18) при сохранении остальных параметров не измененными поправка

$$\Delta k = -319,6 \frac{9792}{410\,763} = -7,6; k_1 = 312.$$

По уравнениям (19) и (20) $k_2 = 314,2; c = 35,49$.

¹ Для β' углы определены по стоградусной шкале, поэтому цифра 100 заменила $\frac{\pi}{2}$.

Параметры				До уточнения		Уточнение k		Уточнение k и c		Уточнение Φ_{∞} и a	
Данные опыта				k	319,6	312	314,2	314,2			
				a	-9 124	-9 124	-9 124	-9 140			
				Φ_{∞}	73 377	73 377	73 377	73 373			
				Φ_0	4 098	4 098	4 524	4 541			
Φ_{ni}	m_n	φ_i	$\operatorname{tg} \varphi_i$	m	μ^2	m	μ_1^2	m	μ_2^2	m	μ_3^2
5 690	0	-5,344	-0,08415	12,55	157,5	12,27	150,56	9,05	81,9	8,16	66,6
8 750	27,5	-0,582	-0,00914	36,5	81	35,7	67,24	32,61	26,1	32,51	25,1
15 000	85,7	+9,145	+0,14465	85,7	0	83,65	4,20	80,94	22,7	80,83	23,7
21 250	140,3	18,872	0,30544	137,0	10,9	133,8	42,25	131,46	78,1	131,35	80,1
27 500	200,9	28,599	0,48211	193,3	57,8	188,95	142,80	186,97	194,0	186,87	196,8
33 750	271,0	38,326	0,68711	259,0	144	252,9	327,61	251,38	384,9	251,28	388,9
40 000	340,1	48,053	0,94063	340,1	0	332,0	65,61	331,04	83,5	330,96	83,5
46 250	431,0	57,783	1,28003	447,7	278,9	437,9	47,61	437,67	44,5	437,60	43,6
52 500	542,2	67,507	1,78609	608,7	4032,2	595,8	2560,36	596,67	2649,2	596,52	2633,7
58 750	831	77,234	2,67613	893,8	3943,8	873,5	1806,25	876,13	1234,1	876,32	1254,5
65 000	1 578	86,961	4,81396	1 578	0	1540,5	1406,25	1547,92	966,0	1548,46	872,6
Сумма . .	4450,7	—	13,02286	—	8606	—	6621	—	5765	—	5662

Уточнения Φ_∞ и a в соответствии с (21) и (22) выны: $\beta = -15,7$; $\gamma = -4$.

Результаты вычислений сведены в таблицу. Наибольшее снижение суммы квадратов погрешностей дает уточнение k (около 23% от исходных). Еще на 10% снижается сумма от совместного уточнения k и c . Поправки к Φ_∞ и a от выигрыш всего в 1,2%, т. е. не существенны. Полное снижение суммы от уточнения всех параметров получается на 34,2% и указывает на небольшое отступление исходных данных, полученных с относительно малой затратой труда, от оптимальных.

Уравнение переходного процесса (2) после подстановки в него (5) и интегрирования напишется так:

$$t = \frac{4\rho w}{\pi \cdot r} \cdot \frac{\Phi_\infty + a}{k} \cos^2 \varphi_c \left[\ln \frac{\sin(\varphi_n - \varphi_c)}{\sin(\varphi - \varphi_c)} - (\varphi_n - \varphi) \operatorname{tg} \varphi_c \right] \cdot 10^{-9}, \quad (24)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_c = \operatorname{tg} \varphi_0 + \frac{U}{k \cdot r}.$$

Применение (24) к расчетам процессов в машинах постоянного тока [Л. 32] и исследованию аппаратов [Л. 33] показало вполне достаточные для практики точность и удобство применения.

Введение с помощью дробнолинейного преобразования дополнительных двух параметров, позволяющих смещать начало координат для аппроксимирующей кривой, другими словами, подбирать ее участок, хорошо совпадающий с опытной, приложимо и к другим функциям, например:

$$i = k \left(\operatorname{sh} \frac{\Phi + a}{\Phi_\infty + a} - \operatorname{sh} \frac{\Phi_0 + a}{\Phi_\infty + a} \right), \quad (25)$$

$$\frac{\Phi + a}{\Phi_\infty + a} = \operatorname{th} \frac{i + b}{k}. \quad (26)$$

К (25) и (26) применима методика определения параметров, аналогичная изложенной.

Предлагаемые методы аппроксимации кривой намагничивания расширяют возможности исследования неустановившихся процессов в обмотках, охватывающих ферромагнитные магнитопроводы.

Литература

1. J. Müller. Pogg. Ann., т. 79, стр. 340, 1850.
2. А. Г. Столетов. Исследование о функции намагничивания мягкого железа. *Ann. d. Phys.*, стр. 146 и 442, 1872.
3. Ch. P. Steinmetz. Bemerkungen über den magnetischen Kreislauf. ETZ, стр. 203, 1892.
4. O. Frölich. (Статьи об электромагнетизме). ETZ, стр. 365, 387, 401, 1893; стр. 368, 517, 554, 1894.
5. E. Müllendorff. (Статьи о намагничивании железа). ETZ, стр. 925, 1901; стр. 25, 1902; стр. 361, 1907.
6. J. Biermans. (Статьи о переходных процессах в цепях, охватывающих железо). A. f. E., стр. 1, 1918; стр. 30, 1921; ETZ, стр. 1495, 1921.
7. M. Déri. Die Gleichung der Magnetisierungskurve. E. u. M., стр. 89, 1917.
8. Koepsel. Eine neue Formel für die Magnetisierungskurve. ETZ, стр. 1361, 1928.
9. Дискуссия Déri-Koepsel. ETZ, стр. 1764, 1928; стр. 38, 181, 558, 1929.
10. E. Weber. Das Schalten magnetisch gesättigter, fremd-erregter Gleichstromkreise. Wissensch. Veröff. aus dem S. K. т. 7, стр. 144, 1928.
11. H. Sequenz. Berechnung der magnetischen Zahnspannung. E. u. M., стр. 1, 1931; A. f. E., стр. 387, 1935.
12. M. J. Bethenod. Formules empiriques pour l'expression mathématique d'une courbe d'aimantation. Bull. SFE, стр. 742, 1934; стр. 113, 1935. Аннотация ETZ, № 20, стр. 570, 1935.
13. K. Seldmayer. Über eine Ersatzgleichung für die Hysteresisschleife. E. u. M., стр. 414, 1935.
14. В. К. Аркадьев. Электромагнитные процессы в металлах. ОНТИ, 1935.
15. G. Grobe. Ein analytischer Ausdruck für die Hysteresisschleife. ETZ, стр. 560, 995, 1934; E. u. M., стр. 83, 1935.
16. C. Macmillan. A new analysis of $B-H$ curves and its application to ferromagnetic behaviour. GER, № 5, стр. 225, 1936; № 6, стр. 291, 1936.
17. H. A. Laurence, M. Carr. A theoretical expression for the magnetising curve of the machine MVG, № 273, 1936. Реферат, Электричество, № 17, стр. 54, 1936.
18. M. R. Rouge. Représentation algébrique de caractéristiques magnétiques. Bull. SFE, № 69, стр. 881, 1936; № 75, стр. 265, 1937.
19. Б. М. Шмуклер. Энергетические процессы при электрическом торможении двигателей постоянного тока. Сборник ХЭТИ, стр. 53, 1937.
20. Н. Ф. Байдак. Аналитическое выражение намагничивающего тока с учетом гистерезисной петли. Электричество, № 4, стр. 64, 1938.
21. W. Hartel. Überschlägige Berechnung von gleichstrommagnetisierten Drosseln. A. f. E., стр. 585, 1939.
22. W. Taeger. Gekoppelte Kreise mit stromabhängiger Induktivität als Kopplungselement. A. f. E., стр. 73, 1939.
23. Л. С. Гольдфарб, Г. Р. Герценберг. Определение гармоник тока и напряжения в электрических цепях, содержащих железо. Электричество, № 1, стр. 64, 1939.
24. Б. М. Шмуклер. Динамическое торможение шунтовых электродвигателей постоянного тока с самовозбуждением. Сб. ХЭТИ, № 6, стр. 91, 1941.
25. Т. Г. Сорокер и Л. М. Петрова. Определение размагничивающего влияния реакции якоря в машинах постоянного тока. ВЭИ, № 6, стр. 12, 1944.
26. L. T. Rader, E. C. Litscher. Some Aspect of Inductance, when Iron is Present. El. Eng., Tr., т. 63, № 3, стр. 133, 1944.
27. Р. Л. Аронов. Выбор основных размеров катушек для аппаратов постоянного тока. Электричество, № 9, стр. 46, 1945.
28. J. D. Ryder. Ferroinductance as a variable electric circuit element. El. Eng. Tr., стр. 671, 1945.
29. Б. С. Сотсков. Об одном способе приближенного вычисления времени протекания переходного процесса в цепях с нелинейными параметрами. Изв. ОТН АН СССР, № 12, стр. 1089, 1945.
30. В. А. Толвинский. Универсальная приведенная характеристика генератора холостого хода и ее аналитическое выражение. Электросила, № 2—3, стр. 11, 1945.
31. А. А. Воскресенский и Е. Ф. Воскресенская. Уравнения кривых намагничивания трансформаторной стали. Электричество, № 4, стр. 63, 1946.
32. Р. Л. Аронов. Расчеты неустановившихся процессов в цепях с железным сердечником. Сборник ХЭТИ № 7, 1947.
33. Р. Л. Аронов. Магнитное реле времени. Монография. Энергоиздат, 1947.



Динамическое равновесие магнитного состояния электрических машин в системе Леонарда

Академик В. П. НИКИТИН, кандидат техн. наук, доц. Н. П. КУНИЦКИЙ

Москва

В настоящей работе условия устойчивости динамического равновесия электрических систем, предложенные академиком В. П. Никитиным и примененные им к электрической дуге в 1925—1927 гг. [Л. 1] и к электроприводу в 1935 г. [Л. 2], распространены на процессы возбуждения и гашения электрических генераторов и двигателей системы Леонарда. В проведенном анализе различных систем возбуждения генератора использованы данные экспериментального исследования систем Леонарда в лаборатории электропривода Центрального научно-исследовательского института черной металлургии, проведенного под руководством Н. П. Куницкого.

Пользуясь основными уравнениями электропривода [Л. 3] для системы Леонарда, нетрудно получить уравнение:

$$\frac{BdE}{Rdt} = B \frac{dI}{dt} + I - I_c, \quad (1a)$$

где B — электромеханическая постоянная привода;

E — э. д. с. генератора;

I — ток главной цепи;

I_c — статический ток, соответствующий статическому моменту сопротивления механизма.

Процесс пуска и реверса можно рассматривать состоящим из двух периодов: периода быстрого нарастания тока от нуля до максимального значения и периода, когда ток желательно сохранить, по возможности, на постоянном, близком к максимальному значении. Продолжительность первого периода относительно невелика, и с целью уменьшения времени пуска и реверса ее желательно сделать как можно меньшей. В течение второго периода величиной $B \frac{dI}{dt}$ можно в первом приближении пренебречь по сравнению со значением динамического тока $I - I_c$, особенно при небольших значениях I_c .

В таком случае из выражения (1a) получим:

$$I - I_c = \frac{B}{R} \frac{dE}{dt},$$

т. е. ток будет пропорционален скорости нарастания или спадания $\frac{dE}{dt}$.

Таким образом, при небольших изменениях тока и при одновременно значительной его величине можно получить представление о характере изменения тока при пуске или реверсе на основании характера изменения величины, $\frac{dE}{dt}$.

Для схем возбуждения генераторов, не имеющих обмоток возбуждения, обтекаемых током главной цепи (или его частью), процесс изменения э. д. с. генератора при возбуждении его в случаях замкнутой и разомкнутой главной цепи будет практически почти одинаков. Поэтому представляет интерес метод определения скорости изменения э. д. с. генератора при возбуждении его в случае разомкнутой главной цепи.

Генератор Леонарда с независимым возбуждением. При приложении к обмотке возбуждения генератора напряжения $\alpha_\phi U_n$, где α_ϕ — коэффициент форсировки; U_n — номинальное напряжение, имеем:

$$\alpha_\phi U_n = i_n r_n + w_n \frac{d\Phi}{dt}, \quad (1b)$$

где i_n , w_n и r_n — ток, число витков и сопротивление обмотки возбуждения;

Φ — поток генератора.

Если форсировку не отключать, то ампервитки $AW_s = i_n w_n$ генератора, постепенно нарастая, достигли бы конечных установившихся так называемых предельных, значений $AW_{np} = \frac{\alpha_\phi U_n w_n}{r_n}$.

Предельные ампервитки согласно выражению [1b] будут:

$$AW_{np} = \frac{\alpha_\phi U_n w_n}{r_n} = AW_s + \frac{w_n^2 \sigma dE}{r_n c_2 n_2 dt}, \quad (2)$$

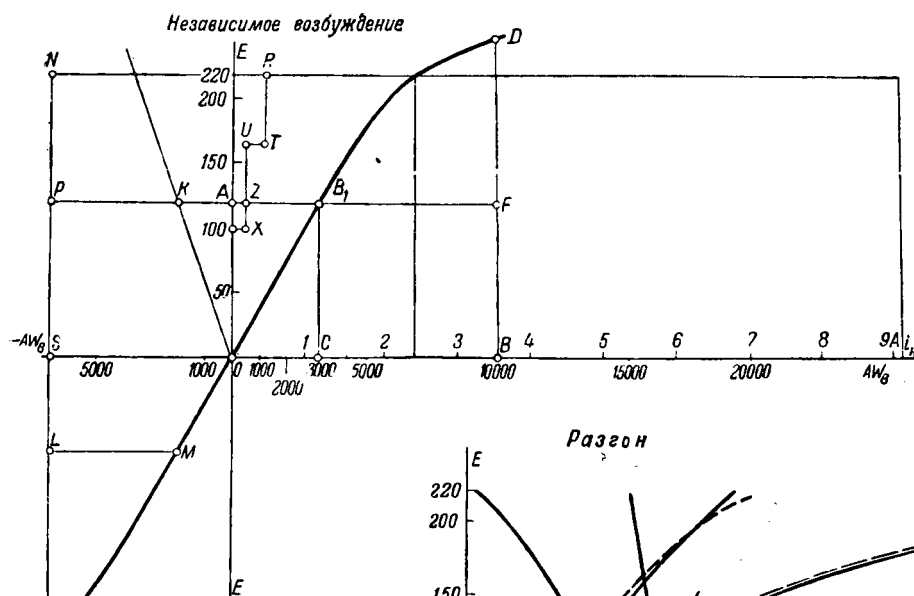


Рис. 1а. Характеристики системы Леонарда с независимым возбуждением.

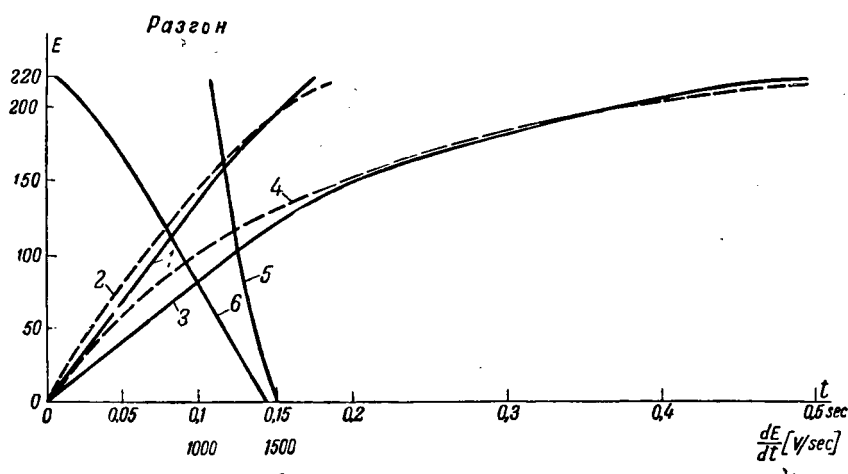


Рис. 1б. Кривые $E = f(t)$ и $\frac{dE}{dt} = \varphi(E)$ при разгоне системы Леонарда с независимым возбуждением.

где c_2 и n_2 — постоянная и число оборотов в минуту генератора;

σ — коэффициент рассеяния потока генератора;

$AW_\theta = i_n \omega_n$ — мгновенные ампервитки.

Для создания мгновенной э. д. с. $E = OA$ (рис. 1а) необходимы ампервитки $AW_\theta = OC$, определяемые по характеристике намагничивания, предельные же ампервитки $AW_{np} = OB$.

Поэтому ампервитки $AW_\theta = CB = AW_{np} - AW_\theta =$

$= \frac{\sigma \omega_n^2 n_2}{r_n c_2 n_2} \frac{dE}{dt}$ являются избыточными или динамическими.

Динамические ампервитки заставляют э. д. с. генератора возрастать. Если динамические ампервитки отсутствуют, то э. д. с. генератора постоянна. Таким образом, отрезки B_1F горизонтальных прямых между вертикалью BD , отображающей зависимость $AW_{np} = f(E)$, и характеристикой намагничивания, представляют динамические ампервитки и, в соответствующем масштабе, скорость нарастания $\frac{dE}{dt} = \frac{r_n c_2 n_2}{\omega_n^2 \sigma} AW_\theta$ э. д. с. при данной ее мгновенной величине OA .

На рис. 1,б даны кривые $E = f(t)$ при разгоне: кривая 1 (расчетная) и 2 (экспериментальная)

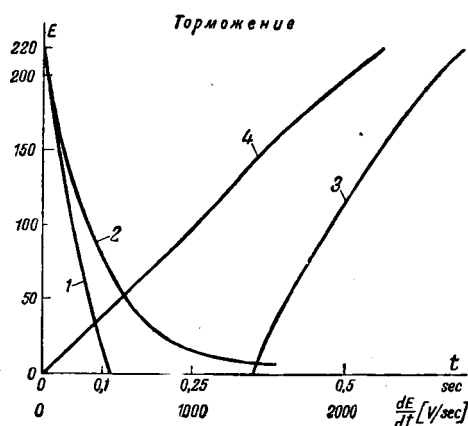


Рис. 1с. Кривые $E = f(t)$ и $\frac{dE}{dt} = \varphi(E)$ при торможении.

для коэффициента форсировки $\alpha_\phi = 3,8$; кривая 3 (расчетная) и 4 (экспериментальная) для случая уменьшения постоянной времени цепи обмотки возбуждения путем включения дополнительного сопротивления $r_\theta = 67,7 \Omega$, а также кривые (расчетные) $\frac{dE}{dt} = \varphi(E)$; кривая 5 для $\alpha_\phi = 3,8$ и 6 для случая

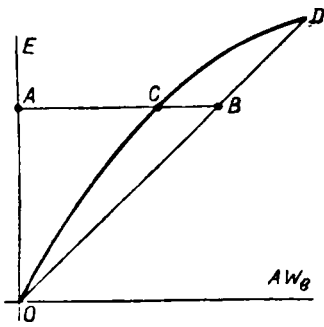


Рис. 2. Характеристика шунтового генератора.

уменьшения постоянной времени цепи обмотки возбуждения при помощи увеличения ее сопротивления. Из рис. 1, б следует, что при уменьшении постоянной времени э. д. с. E нарастает медленно и с большой неравномерностью. Исследование проводилось с генератором ПН-100 8,4 kW, 220 V, 38,2 A, 1 000 об/мин; $\omega_n = 2800$; ток возбуждения 2,4 A; сопротивление обмотки возбуждения 24 Ω ; $c_2 = 18,5$.

Шунтовой генератор. Для обмотки возбуждения шунтового генератора

$$E = i_{ш}(r_{ш} + R_{я}) + w \frac{d\Phi}{dt}, \quad (3)$$

где $i_{ш}$, $w_{ш}$ и $r_{ш}$ — ток, число витков и сопротивление шунтовой обмотки; $R_{я}$ — сопротивление якоря генератора.

Если к шунтовой обмотке приложено напряжение $E = OA$ (рис. 2) генератора, то его ампервитки, постепенно нарастая, достигли бы конечного значения $AB = \frac{E w_{ш}}{r_{ш} + R_{я}}$, соответствующего мгновенной э. д. с. E , если бы эта э. д. с. осталась неизменной. Ампервитки $AW_{np} = \frac{E w_{ш}}{r_{ш} + R_{я}} = AW_s = \frac{\sigma w_{ш}^2 dE}{(r_{ш} + R_{я}) c_2 n_2 dt}$, где $AW_s = i_{ш} w_{ш} = AC$ — мгновенные ампервитки, назовем предельными. Они изображаются прямой OD . Динамические ампервитки

$$AW_d = \frac{\sigma w_{ш}^2 dE}{(r_{ш} + R_{я}) c_2 n_2 dt} = AW_{np} - AW_s = CB, \quad (4)$$

т. е. отрезок CB представляет скорость нарастания E .

Трехобмоточный генератор Леонарда. При возбуждении трехобмоточного генератора вхлостую (при разомкнутой главной цепи) для независимой обмотки возбуждения при наличии форсировки имеем:

$$\alpha_{\phi} U = i_n r_n + w_n \frac{d\Phi}{dt},$$

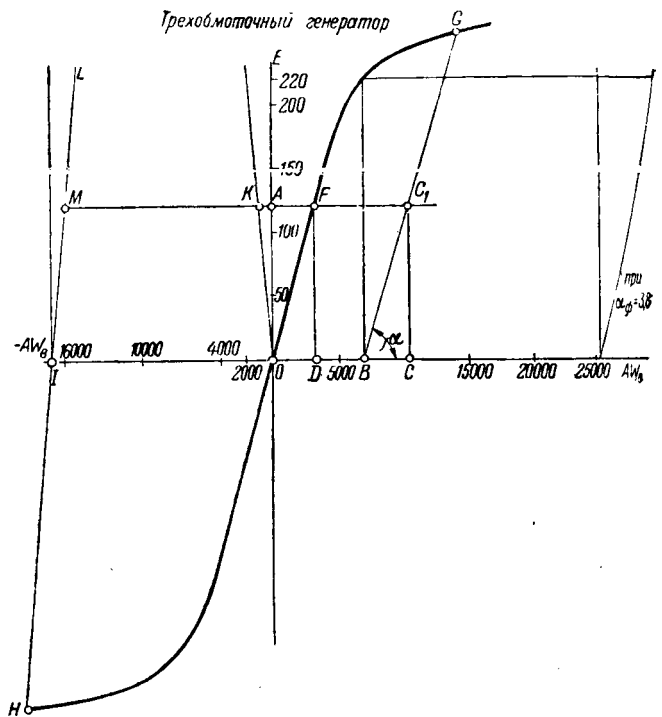
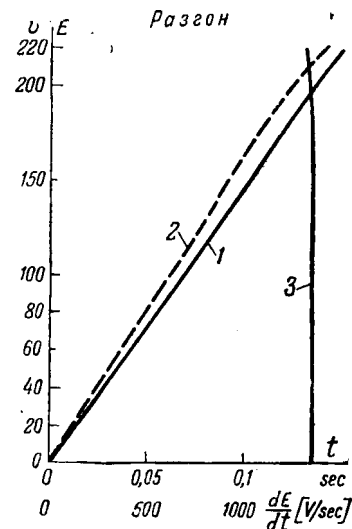


Рис. 3а. Характеристика трехобмоточного генератора Леонарда.

Рис. 3б. Кривые $E = f(t)$ и $\frac{dE}{dt} = \varphi(E)$ при разгоне системы Леонарда с трехобмоточным генератором.

для шунтовой

$$E = i_{ш}(r_{ш} + R_{я}) + w_{ш} \frac{d\Phi}{dt}.$$

При этом пренебрегаем для упрощения потоками рассеяния отдельных обмоток возбуждения и считаем потоки, проходящие через эти обмотки, одинаковыми.

Предельные ампервитки независимой обмотки (рис. 3а):

$$AW_{n,np} = OB = \frac{\sigma_{\phi} U w_n}{r_n} = AW_n + \frac{w_n^2 \sigma dE}{r_n c_2 n_2 dt}; \quad (5a)$$

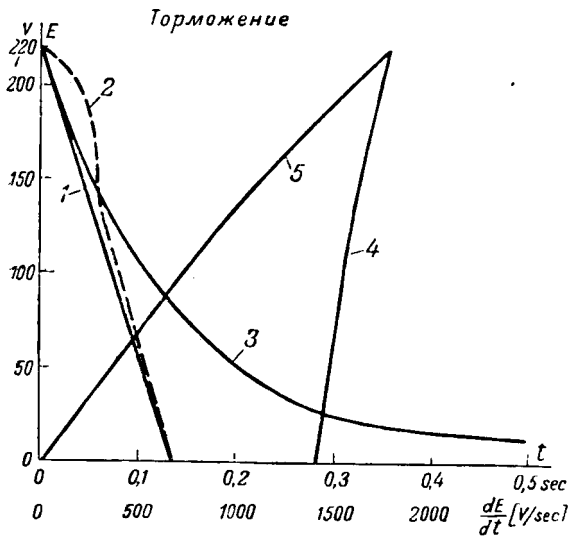


Рис. 3а. Кривые $E = f(t)$ и $\frac{dE}{dt} = \varphi(E)$ при торможении.

предельные ампервитки шунтовой обмотки для э. д. с. $E = OA$:

$$AW_{ш.пр} = BC = \frac{E w_{ш}}{r_{ш} + R_{я}} = AW_{ш} + \frac{\sigma w_{ш}^2 dE}{(r_{ш} + R_{я}) c_2 n_2 dt} \quad (5b)$$

Мгновенные суммарные ампервитки генератора для $E = OA$:

$$AW_g = OD = AW_n + AW_{ш} = i_n w_n + i_{ш} w_{ш}$$

будут согласно выражениям (5а) и (5б):

$$AW_g = \frac{\alpha_{\phi} U w_n}{r_n} + \frac{E w_{ш}}{r_{ш} + R_{я}} - \frac{\sigma}{c_2 n_2} \left(\frac{w_n^2}{r_n} + \frac{w_{ш}^2}{r_{ш} + R_{я}} \right) \frac{dE}{dt}$$

Следовательно, полные предельные ампервитки $AW_{пр} = AC_1 = \frac{\alpha_{\phi} U w_n}{r_n} + \frac{E w_{ш}}{r_{ш} + R_{я}}$ представляются прямой BG (рис. 3а), проведенной под углом $\alpha = \arctg \frac{r_{ш} + R_{я}}{w_{ш}}$ к горизонтали.

Если обозначить

$$T = \frac{\sigma}{c_2 n_2} \left(\frac{w_n^2}{r_n} + \frac{w_{ш}^2}{r_{ш} + R_{я}} \right), \quad (6)$$

то динамические ампервитки

$$AW_{\partial} = FC_1 = T \frac{dE}{dt} \quad (7)$$

Скорость нарастания э. д. с.

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{T} AW_{\partial}, \quad (8)$$

откуда время нарастания э. д. с. генератора до установившейся э. д. с. E_v

$$t_n = T \int_0^{E_v} \frac{dE}{AW_{\partial}} \quad (9)$$

Формулы (6), (7), (8) и (9) являются наиболее общими. Полагая в этих формулах $w_{ш} = 0$, получим случай постоянной форсировки, полагая же $w_n = 0$, — случай шунтового генератора.

На рис. 3б даны: кривая 1 — $E = f(t)$ — расчетная и кривая 2 — экспериментальная, а также кривая 3 $\frac{dE}{dt} = \varphi(E)$ (для $\alpha_{\phi} = 3,8$; $r_{ш} = 46 \Omega$ и $w_{ш} = 840 \Omega$).

Из рис. 1б и 3б следует, что скорость нарастания $\frac{dE}{dt}$ э. д. с. генератора, а следовательно, и пусковой ток при трехобмоточном генераторе гораздо более постоянны, чем при независимом возбуждении.

Торможение в системе Леонарда. Для генератора Леонарда при реверсе в формуле (1б) надо перед $\alpha_{\phi} U_n$ поставить минус, поэтому

$$\text{предельные ампервитки } AW_{пр} = -\frac{\alpha_{\phi} U_n w_n}{r_n}; \text{ они}$$

изображаются прямой HN (рис. 1а). Динамические ампервитки AW_{∂} представляются отрезками PB_1 и LM . Для торможения замыканием обмотки возбуждения на разрядное сопротивление $\alpha_{\phi} U_n = 0$ и предельные ампервитки $AW_{пр} = 0$ изображаются осью ординат $AW_{\partial} = AB_1 = -AW_g$.

Для самогашения $\alpha_{\phi} U_n = -E$ и ампервитки

$$AW_{пр} = -\frac{E w_n}{r_{пр}} \text{ (где } r_{пр} \text{ — приведенное сопротивление цепи самогашения)} \text{ изображаются прямой } OK, AW_{\partial} = KB_1.$$

При торможении уменьшением напряжения генератора путем включения в его цепь возбуждения добавочного сопротивления r_{∂} $AW_{пр} = -\frac{U_n w_n}{r_n + r_{\partial}}$ становится меньше AW_g и изображается ступенчатой ломаной $RTUX$, соответствующей постепенно увеличивающемуся по мере понижения э. д. с. генератора сопротивлению r_{∂} . Динамические ампервитки $AW_{\partial} = AZ$.

$$\text{Скорость } \frac{dE}{dt} = \frac{c_2 n_2 (r_n + r_{\partial})}{w_n^2 \sigma} AW_{\partial}.$$

Для трехобмоточного генератора при реверсе напряжения¹ $AW_{пр} = -\frac{\alpha_{\phi} U w_n}{r_n} + \frac{E w_{ш}}{r_{ш} + R_{я}}$ изображаются прямой HL (рис. 3а), $AW_{\partial} = MF$; при торможении, осуществляемом замыканием

¹ При отключенной серийной обмотке возбуждения.

прямой OM , проведенной под углом $\beta_1 = \text{ctg} \beta_1 = \frac{r_s + R_a}{w_s}$.

Тогда $AW_\partial = LK$.

Будем под начальным коэффициентом форсировки α_ϕ при амплидинном возбудителе понимать отношение ампервитков независимой обмотки амплидина к его установившимся ампервиткам AW_{ay} . При испытании обмотка возбуждения генератора ПН-100 питалась от амплидина 5 kW, 220 V, $R = 2,8 \Omega$, $AW_{ay} = 14$.

На рис. 6 даны кривые $E = f(t)$ нарастания э. д. с. генератора с амплидинным возбудителем: кривая 1 (расчетная) и 2 (экспериментальная) для $\alpha_\phi = 3$, кривая 3 (расчетная) и 4 (экспериментальная) для $\alpha_\phi = 15$; кривая 5 для $\alpha_\phi = 6$, также кривые $\frac{dE}{dt} = \varphi(E)$: для $\alpha_\phi = 3$ — кривая 6, для $\alpha_\phi = 6$ — кривая 7 и для $\alpha_\phi = 15$ — кривая 8.

Из рис. 6 следует, что при небольшом начальном коэффициенте форсировки $\alpha_\phi = 3$, приведенной фирмой ГЭС для амплидинного возбудителя вспомогательных механизмов одного станционного у нас блюминга, характер изменения динамических ампервитков с возрастанием э. д. с. генератора явно неблагоприятен. Скорость нарастания $\frac{dE}{dt}$ э. д. с. генератора, а сле-

довательно, и пусковой ток по мере повышения э. д. с. генератора до номинального значения будут сильно падать. Поэтому время нарастания э. д. с. генератора до номинального значения будет относительно весьма велико (0,45 вместо 0,19 сек при независимом возбуждении генератора с коэффициентом форсировки $\alpha_\phi = 3,8$). Весьма характерно отметить, что это имеет место при уменьшенной [Л. 4] приведенной постоянной времени цепи возбуждения генератора, что создается встречно включенной управляющей обмоткой амплидина.

Введение же в схему для повышения равномерности пускового тока размагничивающих стабилизирующих ампервитков еще более увеличивает время разгона за счет снижения скорости

Из рис. 6 также следует, что повышение начального коэффициента форсировки (например, до 15) приводит к большому постоянству динамических ампервитков, вследствие чего уменьшается время разгона и увеличивается равномерность изменения $\frac{dE}{dt}$ и пускового тока

Уравнение динамического равновесия магнитного состояния генератора. Равновесие процесса возбуждения генератора определяется точкой A (рис. 7) пересечения характеристики исполнительного органа — характеристики намагничивания генератора $E = f(AW_s)$ и характеристики задающего органа — кривой зависимости предельных ампервитков от э. д. с.:

$$AW_{np} = f_1(E).$$

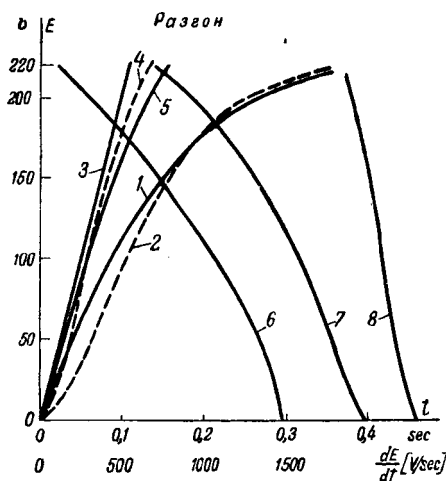


Рис. 6. Кривые $E = f(t)$ и $\frac{dE}{dt} = \varphi(E)$ при разгоне системы Леонарда с амплидинным возбудителем.

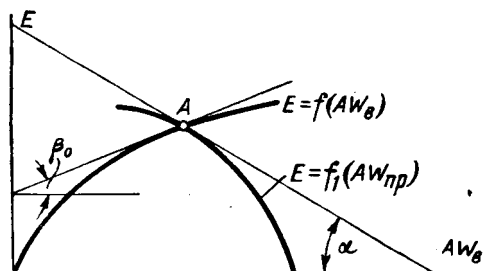


Рис. 7. Характеристики намагничивания и предельных ампервитков.

Для небольших отклонений от установившихся значений (в общем случае), например при регулировании напряжения генератора, участки характеристики вблизи положения равновесия можно считать прямолинейными (рис. 7) с уравнениями²

$$E = \text{ctg} \beta_0 AW_s + E_{os} \text{ и } E = \text{ctg} \alpha AW_{np} + E_{onp},$$

$$\text{где } \text{ctg} \beta_0 = \frac{dAW_s}{dE}; \text{ctg} \alpha = \frac{dAW_{np}}{dE};$$

E_{os} и E_{onp} — отрезки, отсекаемые на оси ординат прямыми, заменяющими участки кривых $E = f(AW_s)$ и $E = f_1(AW_{np})$.

Тогда уравнение $AW_\partial = AW_{np} - AW_s$ можно написать в виде:

$$\frac{dE}{dt} + \frac{E}{T} (\text{ctg} \beta_0 - \text{ctg} \alpha) = \frac{1}{T} (E_{os} \text{ctg} \beta_0 - E_{onp} \text{ctg} \alpha).$$

Для свободного процесса изменения э. д. с. генератора имеем:

$$\frac{dE}{dt} + \frac{E}{T} (\text{ctg} \beta_0 - \text{ctg} \alpha) = 0 \quad (13a)$$

или

$$\frac{dE}{dt} + \frac{E}{T} \left(\frac{dAW_s}{dE} - \frac{dAW_{np}}{dE} \right) = 0. \quad (13b)$$

² Значение $\text{tg} \alpha$ алгебраическое.

Уравнение (13b) совершенно аналогично уравнениям динамического равновесия электропривода [Л. 2] и электрической дуги [Л. 1]. Величина $\frac{dAW_s}{dE} - \frac{dAW_{np}}{dE} = S$ может быть здесь также названа коэффициентом устойчивости [Л. 2]. Тогда

$$\frac{dE}{dt} + \frac{SE}{T} = 0.$$

При $S < 0$ система возбуждения неустойчива. В системе возбуждения генератора взаимодействие между „действующими“ предельными ампервитками AW_{np} и ампервитками „сопротивления“ AW_s вызывает изменение э. д. с. E генератора.

При $AW_{np} > AW_s$ э. д. с. E растет, а при $AW_{np} < AW_s$ E падает.

Если в системе имеет место только электромагнитная инерция обмотки возбуждения генератора, то свободный переходной процесс э. д. с.

описывается уравнением $E = Ce^{-\frac{St}{T}}$, совершенно аналогичным подобному уравнению электропривода [Л. 2] или же соответствующему уравнению электрической дуги [Л. 1]. Таким образом, коэффициент устойчивости S определяет время переходного процесса. Чем больше S , тем быстрее протекает процесс возбуждения генератора.

Выводы. В течение второй части процесса пуска или реверса, когда ток двигателя уже возрос до максимального значения, скорость изменения $\frac{dE}{dt}$ э. д. с. генератора дает представление

о характере изменения тока. Динамические ампервитки, представляющие собой разность между предельными ампервитками возбуждения, приложенными к генератору, и ампервитками, имеющими место в данный момент, пропорциональны скорости $\frac{dE}{dt}$. При постоянстве динамических ампервитков ток при пуске и реверсе также постоянен. Величина этого тока определяется значением динамических ампервитков.

Наиболее рациональными являются те схемы, которые обеспечивают постоянные динамические ампервитки.

Литература

1. В. П. Никитин. Электрические машины и трансформаторы, ОНТИ, 1937.
2. В. П. Никитин. О динамическом равновесии систем с непрерывно меняющейся нагрузкой. Известия ОНТИ Академии наук СССР, № 9, 1940.
3. В. К. Попов. Основы электропривода, 1945.
4. В. П. Никитин, Н. П. Куницкий. Система Леонарда с амплитудным возбудителем при ограниченном моменте двигателя в неподвижном состоянии. Электричество, № 7, 1947.
5. В. П. Никитин, Н. П. Куницкий. Динамическое равновесие магнитного состояния электрических машин в системе Леонарда. Известия Академии наук СССР, ОНТИ АН СССР, № 5, 1948.



Новый механический тормоз для испытания двигателей

Кандидат техн. наук, доц. М. С. МИХАЙЛОВ-МИКУЛИНСКИЙ

Московский энергетический институт им. Молотова

В известных механических тормозах с пружинными динамометрами стрелки динамометров непрерывно и сильно вибрируют, что мешает точному отсчету силы. Причинами вибрации динамометра являются дрожание двигателя и непостоянство силы трения ленты о шкив, вызываемые различными причинами. Если заменить обычный пружинный динамометр другим динамометром, обладающим значительной массой и хорошо демпфированным, то он не будет отзываться на случайные и кратковременные толчки и покажет среднее значение силы.

Недостатки существующих тормозов и большая нужда в простом и надежном механическом тормозе для учебных и заводских лабораторий и испытательных станций побудили автора разработать новую систему динамометра и тормоза, описание которых дано ниже.

Гидростатический динамометр¹. Для измерения силы можно использовать законы Архимеда и «сообщающихся сосудов». В сосуд A цилиндрической формы налита жидкость (рис. 1). Сбоку сосуда расположено сообщающееся с ним водомерное стекло. В этом сосуде плавает почти полностью погруженный цилиндр B . Цилиндр B — пустотелый и заполнен почти полностью жидкостью, играющей в нем роль балласта.

Если B плавает свободно в A , то это означает, что все силы, действующие на него, взаимно уравновешены. Уровень жидкости в A и в водомерном стекле будет одинаков. Обозначим этот уровень на шкале u водомерной трубки O . Если под действием силы Q сосуд B приподнимается, то уровень жидкости в A и в водо-

¹ Заявка в МЭП № 1667.

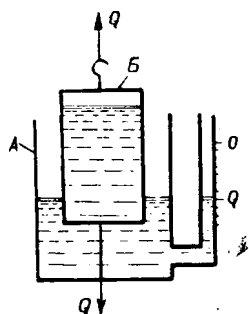


Рис. 1.

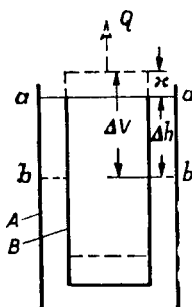


Рис. 2.

в жидкости понизится. Цилиндр *Б* поднимется в жидкости настолько, чтобы уравновесить силу *Q*. Следовательно, силе *Q* соответствует новый уровень жидкости в стекле. Поэтому у нового уровня на шкале можно пометить *Q*. Каждому значению силы *Q* будет соответствовать свой уровень жидкости. Градуировку динамометра проще всего производить при помощи гири. Как показано ниже, при постоянном сечении внешнего сосуда изменение уровня жидкости пропорционально силе *Q*, благодаря чему шкала получается равномерной. В этом и состоит устройство и принцип действия гидростатического динамометра.

Определим количественные соотношения для гидростатического динамометра. Пусть при отсутствии внешней силы *Q* тело *Б* погружено в жидкость так, что его верхняя кромка совпадает с уровнем жидкости *aa* (рис. 2). Приложив силу *Q*, направленную вверх, заставим *Б* подняться от исходного положения на расстояние *x*. Уровень жидкости понизится на Δh . Вследствие подъема *Б* и смещения уровня жидкости часть *Б*, имеющая объем ΔV , поднимется выше уровня и уравнивает силу *Q*:

$$Q = \Delta V \gamma, \quad (1)$$

где *Q* — сила, г;
 ΔV — объем, см³;
 γ — удельный вес, г/см³.

Объем ΔV можно представить выражением

$$\Delta V = S_2 (\Delta h + x), \quad (2)$$

где S_2 — площадь поперечного сечения тела *Б*, см²;
 Δh — падение уровня жидкости, см;
x — перемещение *Б* вверх, см.

Подставляя ΔV из (2) в (1), получаем:

$$\Delta h + x = \frac{Q}{S_2 \gamma}. \quad (3)$$

При перемещении *Б* на *x* вверх под ним освободится пространство, равное $S_2 x$, которое заполнится жидкостью, ранее находившейся между стенками *А* и *Б* на расстоянии *x* и теперь ушедшей отсюда; поэтому можно написать,

$$S_2 x = (S_1 - S_2) \Delta h. \quad (4)$$

Здесь S_1 — площадь поперечного сечения сосуда *А*. Подставляя значение *x* из (4) в (3), получим:

$$\Delta h = \frac{Q}{S_1 \gamma}. \quad (5)$$

Таким образом, мы показали, что изменение уровня жидкости пропорционально силе *Q*.

Расчет динамометра может быть произведен при заданной максимальной силе Q_m и заданной чувствительности. Положим, что желательная чувствительность составляет $C_Q \left[\frac{\text{г}}{\text{см}} \right]$. При заданных Q_m и C_Q максимальное изменение уровня жидкости в сосуде *А* будет:

$$h = \frac{Q_m}{C_Q}. \quad (6)$$

Полагая *h* равным Δh , из (5) получим:

$$S_1 = \frac{Q_m}{\gamma h}, \quad (6a)$$

а также

$$C_Q = \gamma S_1. \quad (7)$$

Выбрав жидкость (обычно воду или еще лучше керосин) удельного веса γ в соответствии с (7) или (8), определяют поперечное сечение сосуда *А* и его диаметр D_1 по равенству:

$$D_1 = 2 \sqrt{\frac{S_1}{\pi}}. \quad (8)$$

Зазор между сосуда *А* и *Б* примем равным δ . Следовательно, диаметр сосуда *Б* $D_2 = D_1 - 2\delta$.

Так как сосуд *Б* с налитой в нем жидкостью должен весить не менее Q_m , то его высота

$$H_2 \geq \frac{4Q_m}{\pi D_2^2 \gamma}. \quad (9)$$

Максимальное перемещение сосуда *Б*, соответствующее действующей на него силе Q_m ,

$$\beta = H_2 - h. \quad (10)$$

Примем, что при отсутствии внешней силы *Q* сосуд *Б* не доходит до дна сосуда *А* на 1 см, а также, что при перемещении сосуда *Б* вверх на β он не должен подниматься над краями сосуда *А*. В этом случае высота сосуда

$$H_1 = H_2 + \beta + 1 = 2H_2 - h + 1. \quad (11)$$

Вышеприведенные уравнения позволяют легко рассчитать динамометр.

Как видно из расчета, чувствительность динамометра может быть выбрана практически любая.

Гидростатический динамометр может быть применен для измерения веса и других сил, а также в качестве динамометра при испытаниях различных двигателей.

Применение гидростатического динамометра для испытания электрических двигателей. На вал двигателя насаживается пустотелый тормозной шкив (рис. 3). На наружной поверхности шкива лежит тормозная лента, концы которой стягиваются при помощи винта. К ленте прикреплен гибкий, легкий и прочный шнур (или тросик). Шнур проходит далее через ролик, расположенный над динамометром, и прикрепляется к сосуду *Б* динамометра. При вращении двигателя тормозной шкив влечет за собой тормозную ленту, лента тянет шнурок, а шнурок — сосуд *Б*. Сосуд *Б* поднимается настолько, чтобы его вес уравнивал силу трения между лентой и шкивом, после чего лента начнет скользить по поверхности шкива.

Вращающий момент двигателя равен произведению QR , где *R* — расстояние между осями вала и шнурка. Следовательно, динамометр может быть градуирован в единицах вращающего момента.

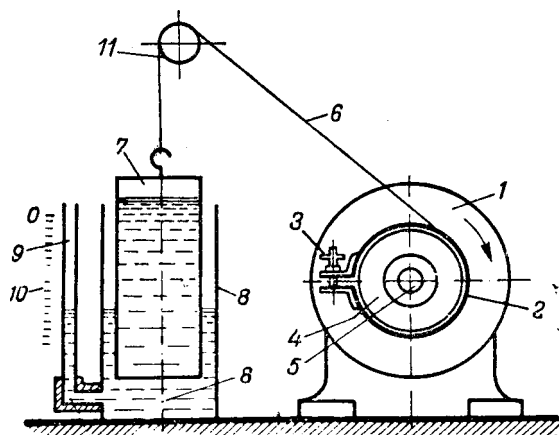


Рис. 3.

1 — испытуемый двигатель; 2 — тормозная лента; 3 — натяжной винт; 4 — тормозной шкив; 5 — вал двигателя; 6 — шнурок; 7 — внутренний сосуд; 8 — внешний сосуд; 9 — водомерное стекло; 10 — шкала; 11 — ролик.

Такой динамометр построен и применен в лаборатории электрических машин Московского энергетического института им. Молотова при испытании двигателей постоянного тока мощностью 2—4 кВт при 1300—2000 об/мин. При испытании он обнаружил много ценных качеств. Работает тормоз спокойно, без вибрации уровня жидкости в водомерном стекле, поэтому отсчет момента производится уверенно. Тормоз легко и плавно регулирует нагрузку на валу двигателя от минимально необходимой до максимально допустимой и показал очень хорошую чувствительность и безотказность в работе.

Изготовление тормоза весьма просто и дешево.

Приводим результаты испытания в МЭИ инженерами Б. Я. Гусевым и Е. А. Мишажиной двигателя постоянного тока со следующими номинальными данными: мощность 2,8 кВт, напряжение 110 В, ток 32 А, 1500 об/мин.

Для двигателя были сняты две зависимости к. п. д. η от полезной мощности P_2 . Один раз зависимость снималась по методу холостого хода. Опыт холостого хода и расчеты производились с точным соблюдением всех требований ГОСТ 183-41. Другая зависимость снималась непосредственным методом — путем нагружения двигателя тормозом с гидростатическим динамометром. Перед началом измерений непосредственным методом двигатель был прогрет на ходу до установившегося теплового состояния при номинальной нагрузке. Температура окружающей среды была 15°С. Обе зависимости представлены в таблице.

Если принять предварительно за истинный к. п. д. машины при номинальных условиях его значение, найденное по методу холостого хода, т. е. $\eta_k = 0,76$, то в соответствии с ГОСТ 183-41 допуск на к. п. д. для нашей машины составляет $0,2 (1 - \eta) = 0,048 = 4,8\%$. Легко видеть из

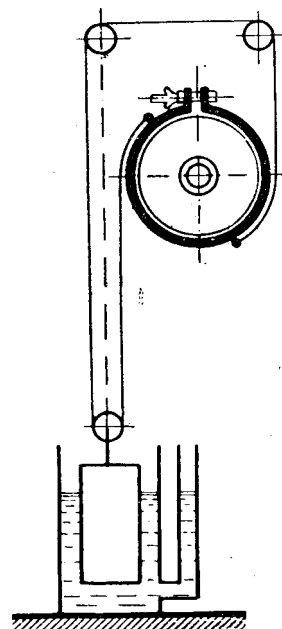


Рис. 4.

P_2 , kW	3,22	2,8	2,55	1,72	1,25	0,72	0,24
$\eta_{\text{кост}}, \%$	75,7	76,0	75,0	72,8	68,4	59,0	30,5
$\eta_{\text{неп}}, \%$	75	77,2	77,3	72,6	69,1	57,4	31,0
$\eta_{\text{кост}} - \eta_{\text{неп}}, \%$	+0,7	-1,2	-2,3	+0,2	-0,7	+1,6	-0,5

таблицы, что ни в одной точке мы не имеем подобных отклонений, что свидетельствует о точности измерений, достигаемой вышеописанным тормозом.

Эти результаты также показывают целесообразность применения тормоза при измерении как высоких, так и низких к. п. д. Принимая во внимание, что при непосредственном методе определения к. п. д. машина работает в естественных для нее условиях, благодаря чему температура обмоток и потери в них, потери на коллекторе и добавочные потери имеют свои натуральные значения, а не условно расчетные, а также, что полезная механическая мощность измеряется с весьма большой точностью, мы приходим к заключению, что измерение к. п. д. с помощью ленточного тормоза с гидростатическим динамометром дает результаты, более достоверные, чем любой существующий метод.

С помощью этого тормоза легко измеряется сила трения покоя подшипников или щеток о коллектор и т. д.

При испытании микромашин следует позаботиться о разгрузке их подшипников от дополнительных усилий, обусловленных односторонним действием силы натяжения шнурка в системе, изображенной на рис. 3. Это возможно, если применить тормозное устройство по схеме, изображенной на рис. 4.

Тепловой процесс в сухом трансформаторе

Кандидат техн. наук Л. М. ШНИЦЕР

Московский трансформаторный завод им. КУЙБЫШЕВА

В трансформаторе с естественным воздушным охлаждением тепловой процесс значительно сложнее, чем в масляном трансформаторе. Конвекция масла в каналах разделяет источники тепла на самостоятельные «тепловые хозяйства». Нагрев отдельной обмотки, например, зависит от потерь, выделяемых только в ней одной. Ввиду этого достаточно знать нагрев обмоток и потерях, соответствующих номинальной нагрузке масляного трансформатора, чтобы без труда определять нагрев обмоток при всякой другой нагрузке. В сухом же трансформаторе естественная конвекция одна не отводит потерь полностью, а теплоотдача поверхностей в каналах лучеиспусканием ограничена. При данных собственных потерях обмотки нагрев ее зависит еще от нагрева магнитопровода и, наоборот, нагрев магнитопровода зависит от нагрузки.

Необходимость учета взаимного влияния отдельных источников тепла друг на друга очевидна. Только при посредстве такого учета возможно выявление перегрузочной способности такого трансформатора. На значительность такого влияния указывает М. Видмар, говоря, что «тепловое хозяйство стали вмешивается в тепловое хозяйство меди и, в конце концов, начинает грозить сухому трансформатору гораздо серьезнее, чем джоулево тепло в меди» [Л. 2, 149]. Однако, в дальнейших своих рассуждениях он упускает из виду этот важный фактор и пишет: «Не теплота стального сердечника непосредственно обременяет изолирующий материал обмотки; собственная теплота обмотки важна быть в первую очередь принята во внимание при проектировании ее активной поверхности» [там же, § 150].

Исследование проф. Г. И. Петрова «О нагревании катушек, обтекаемых током» [Л. 1] также рассматривает катушку вне влияния ближайших источников тепла. Оно, впрочем, ограничивается рассмотрением определения температуры внутри катушек, где распространение тепла происходит, главным образом, путем теплопроводности.

Но тепловой процесс в целом, как уже сказано выше, не может рассматриваться для одной катушки вне зависимости от соседних катушек и магнитопровода.

С целью выявления необходимых для учета взаимного влияния факторов и установления существующей между ними связи, выраженной в виде кривой или математической формулы, было проведено описанное ниже лабораторное исследование.

Предполагалось, что при некоторых определенных для данного трансформатора плотностях тепловых потоков в магнитопроводе и обмотке возможно добиться температурного рав-

новесия, так чтобы исключить возможность перехода тепла от одного источника к другому. Если температурного равновесия нет, то происходит теплообмен между обмоткой и магнитопроводом вследствие того, что тепловой поток от более горячего источника направляется к менее горячему.

Было намечено провести на соответствующей модели условной номинальной мощности 100 kVA 15 тепловых режимов: 3 длительных режима холостого хода при индукциях в стержнях 10,000, 12,000 и 14,000 Gs; 3 длительных режима короткого замыкания для токов $0,8 I_n$, I_n и $1,2 I_n$; 9 режимов нагрузочных—комбинаций режимов холостого хода и короткого замыкания.

Уже беглый анализ проведенных режимов показал, что для учета теплообмена между различными источниками тепла значение имеет не столько направление теплового потока, сколько относительно близкое соседство этих источников.

Действительно, рассмотрим поверхность S , выделяющую потери P и находящуюся вне сферы влияния каких-либо других источников тепла. Пусть τ —перегрев этой поверхности над окружающим воздухом при установившемся режиме. Обозначив через k_k и k_u коэффициенты теплоотдачи конвекцией и соответственно лучеиспусканием, имеем в первом приближении:

$$P = (k_k S + k_u S) \tau. \quad (1)$$

Рассмотрим теперь две равные и параллельные между собой поверхности¹ S (рис. 1). Пусть P_1 и P_2 —выделяемые ими потери, τ_1 и τ_2 —их перегревы при установившемся режиме. При достаточном удалении поверхностей друг от друга можно по отношению к каждой из них применять соотношение (1), снабдив буквы P и τ индексом 1 для одной поверхности и индексом 2—для другой. Если расстояние a не настолько велико, чтобы можно было считать исключенным взаимное влияние обоих тепловых потоков на нагрев поверхностей, то теплоотдача лучеиспусканием уменьшится. Приняв теплоотдачу лучеиспусканием с свободной поверхности за единицу, имеем для теплоотдачи лучеиспусканием при наличии близлежащей нагретой поверхности только $(1 - \sigma)$, где σ есть коэффициент, меньший единицы, зависящий, исключительно от размеров a и h указывающий, на какую

¹ Для упрощения рис. 1 предположено, что теплоотдача возможна только с внутренней стороны каждой поверхности S и изображен тепловой поток только с одной (левой) поверхности.

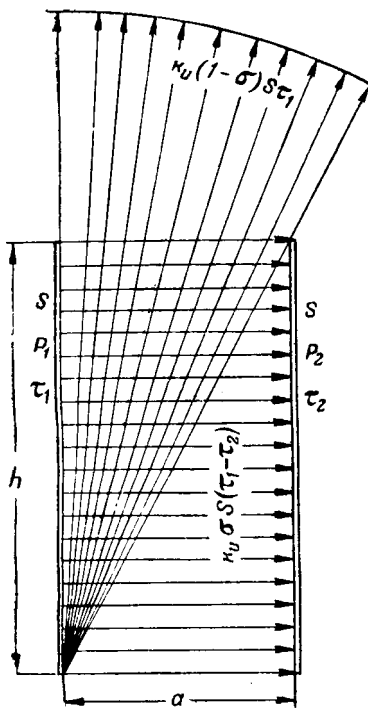


Рис. 1.

долю уменьшилась отдача тепла лучеиспусканием.

В этом случае имеем:

$$P_1 = k S \tau_1 + k_u (1 - \sigma) S \tau_1 + k_u \sigma S (\tau_1 - \tau_2), \quad (2)$$

$$P_2 = k S \tau_2 + k_u (1 - \sigma) S \tau_2 + k_u \sigma S (\tau_2 - \tau_1). \quad (3)$$

В каждом из этих соотношений первый член правой части выражает теплоотдачу в окружающую среду через конвекцию; второй член — теплоотдачу в окружающую среду лучеиспусканием; третий — отдачу тепла лучеиспусканием на близлежащую поверхность.

Из соотношения (1), (2) и (3):

$$\tau = \frac{P}{(k_k + k_u) S}, \quad (1a)$$

$$\tau_1 = \frac{P_1 + K_u \sigma S \tau_2}{(K_k + K_u) S}, \quad (2a)$$

$$\tau_2 = \frac{P_2 + K_u \sigma S \tau_1}{(K_k + K_u) S}. \quad (3a)$$

При $P_1 = P$ имеем $\tau_1 > \tau$. Точно так же при $P_2 = P$ имеем $\tau_2 > \tau$. Все происходит так, как если бы к потерям P_1 прибавились еще потери

$$P'_2 = K_u \sigma S \tau_2, \quad (4)$$

а к потерям P_2 прибавились потери

$$P'_1 = K_u \sigma S \tau_1. \quad (5)$$

Из соотношений (5) и (2a) выводим:

$$\frac{P'_1}{P_1} = \frac{K_u \sigma S \tau_1}{(K_k + K_u) S \tau_1 - K_u \sigma S \tau_2}.$$

В практике трансформаторостроения имеем $\tau_2 \approx \tau_1$, следовательно:

$$\frac{P'_1}{P_1} = \frac{K_u \sigma}{K_k + K_u (1 - \sigma)} = \lambda = \text{const.} \quad (6)$$

Точно так же из соотношений (4) и (3a) выводим:

$$\frac{P'_2}{P_2} = \frac{K_u \sigma}{K_k + K_u (1 - \sigma)} = \lambda,$$

откуда

$$P'_1 = \lambda P_1, \quad P'_2 = \lambda P_2.$$

Таким образом, если две параллельные поверхности S_1 и S_2 — выделяющие потери P_1 и P_2 , находятся на близком расстоянии друг от друга, то для учета нагрева следует исходить из потерь

$$P_1 + \lambda P_2 \text{ для } S_1 \text{ и } P_2 + \lambda P_1 \text{ для } S_2.$$

Коэффициент λ будем называть коэффициентом теплообмена между поверхностями S_1 и S_2 .

Экспериментальное исследование. Построенная и исследованная модель представляет собой однофазный двухстержневой магнитопровод с возбуждающей обмоткой (для создания магнитного потока) на одном стержне и с двумя цилиндрическими обмотками НН и ВН — на другом стержне.

Так как имелось в виду исследовать нагрев сухого трансформатора мощностью порядка 100 kVA и напряжением ВН 6 000 V, то необходимо было предусмотреть многослойную (цилиндрическую) обмотку из круглой меди с соответствующей междуслойной изоляцией. Возможность пользоваться для измерения температуры заложенными в такую высоковольтную обмотку термодатчиками исключена, конечно. Во избежание индуктированных высоких напряжений обмотки (как ВН, так и НН) выполнены бифилярными. Их нагрузки производились путем питания от посторонних источников.

Для измерения температур были заложены магнитопровод и обмотки 84 термодатчиков.

Таблица 1

Номер режима	Индукция, Gs	P_{HH}, W	P_{BH}, W	Наибольший перегрев магнитопровода (по термометру) °C	Среднее значение перегрева по сопротивлению (°C)	
					τ_{HH}	τ_{BH}
1	10 000	0	0	67,8	15,4	4,2
2	12 000	0	0	85,0	23,1	6,9
3	14 000	0	0	122,5	30,6	9,3
4	0	200	330	30,5	63,3	78,4
7	10 000	200	330	79,5	79,6	80,8
10	12 000	200	330	99,0	79,5	82,5
13	14 000	200	330	123,5	84,5	83,0
5	0	250	415	36,0	75,8	93,4
8	10 000	250	415	80,5	85,8	97,5
11	12 000	250	415	99,0	89,5	97,0
14	14 000	250	415	126,5	94,8	96,7
6	0	300	500	40,5	85,8	108,0
9	10 000	300	500	89,0	97,4	110,0
12	12 000	300	500	106,5	112,0	111,0
15	14 000	300	500	129,0	105,9	111,0
16	0	300	0	33,5	72,0	15,0
17	0	250	0	29,5	63,3	12,0
18	0	0	500	12,5	24,5	101,2
19	0	0	415	10,5	21,0	89,0

Табл. 1 ясно показывает взаимное влияние источников тепла друг на друга. Так, при одной и той же индукции B , равной 10 000 Gs, превышение температуры магнитопровода изменяется от 67,8 до 89,0°C, когда нагрузка обмоток возрастает от 0 до 300 ÷ 500 W. Для тех же изменений нагрузки превышение температуры магнитопровода изменяется от 85 до 103,5°C при индукции 12 000 Gs и от 122,5 до 129°C при 14 000 Gs. Точно так же при одних и тех же нагрузках $P_{HH}=200$ W и $P_{BH}=330$ W их нагрев возрастает соответственно от 63,3 до 84,5°C и от 78,4 до 83,0°C, когда индукция изменяется от 0 до 14 000 Gs.

Следует отметить, что нагрев обмотки BH , удаленной от магнитопровода, весьма мало изменяется с изменением индукции от 0 до 14 000 Gs. На нагрев же обмотки HH влияют, очевидно, как потери в магнитопроводе, так и потери в обмотке BH .

Обозначив P_0 , P_{HH} и P_{BH} , соответственно, потери в магнитопроводе, в обмотке HH и в обмотке BH , мы должны для учета их нагрева исходить из потерь:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= P_{BH} + \lambda P_{HH} \text{ для обмотки } BH, \\ P_2 &= P_{HH} + \lambda P_{BH} + \lambda_0 P_0 \text{ для обмотки } HH, \end{aligned} \right\} (7)$$

где λ_0 и λ — коэффициенты теплообмена между магнитопроводом и HH и, соответственно, между HH и BH .

С целью четкого выявления зависимости нагрева обмотки HH от потери BH и отдельно от потерь в магнитопроводе проведены режимы № 16, 17, 18 и 19, при которых благодаря бифилярной намотке оказалось возможным грузить отдельно каждую из обмоток BH и HH .

Сопоставим режимы 18, 16 и 6:

Номер режима	Индукция B , Gs	P_{HH} , W	P_{BH} , W	τ , °C	τ_{HH} , °C	τ_{BH} , °C
18	0	0	500	12,5	24,5	101,2
16	0	300	0	33,3	72,0	15,0
6	0	300	500	40,5	85,8	108,0

При одновременной нагрузке HH и BH потерями 300 и 500 W эти обмотки нагреваются больше, чем при раздельной нагрузке каждой обмотки теми же потерями. Объясняется это тем, что в первом случае на нагрев обмоток BH и HH воздействуют потери $P_1 = P_{BH} + \lambda P_{HH}$ и, соответственно, $P_2 = P_{HH} + \lambda P_{BH}$; во втором же случае каждая из обмоток нагревается от собственных только потерь.

Далее, в опыте 16 нагрелась также обмотка BH , лишенная в овсе собственных потерь; точно так же в опыте 18 нагрелась лишенная собственных потерь обмотка HH . В этих случаях мы имеем: $P_1 = \lambda P_{HH}$, $P_2 = \lambda P_{BH}$, откуда и можно определить численное значение коэффициента λ .

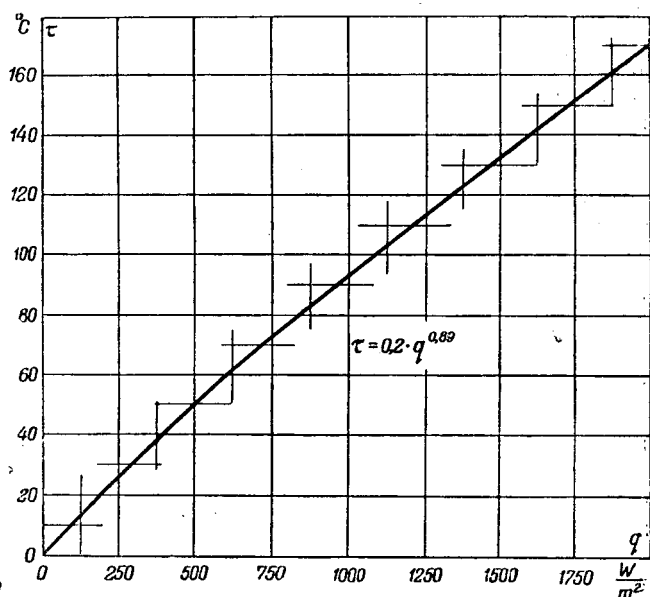


Рис. 2.

Для упрощения расчетов делаем допущение, что среднее (по сопротивлению) превышение температуры обмотки одинаково по всей поверхности наружной и внутренней.

Далее, на основании данных разных испытаний принимаем для теплоотдачи $q = \frac{P}{S_{BH}} \left[\frac{W}{m^2} \right]$ наружной свободной поверхности BH :

$$q = 6,1 \tau^{1,12} \quad (8)$$

или

$$\tau = 0,2 q^{0,89} \quad (9)$$

(что для $\tau = 60^\circ\text{C}$ дает $q = 600 \text{ W/m}^2$ — число, подтверждаемое опытом при вертикальных поверхностях высотой до 1 м).

Для внутренних поверхностей можно, очевидно, применять те же формулы (8) и (9) при условии учета для

Таблица 2

Номер режима	$\frac{\tau_{HH}}{\tau_{BH}}$		Погрешность, %	Номер режима	$\frac{\tau_{HH}}{\tau_{BH}}$		Погрешность, %
	по расчету	по опыту			по расчету	по опыту	
4	65,5	63,3	+3,5	6	93	85,8	+8,4
	78	78,4	0		113	108	+4,6
7	77	79,6	-3,3	9	104	97,4	+6,8
	80	80,8	-1,0		115	110	+4,5
10	82	79,5	+3,2	12	110	102	+7,8
	81	82,5	-1,8		115	111	+3,6
13	88	84,5	+4,1	15	117	105,9	+10
	82	83	-1,2		116	111	+4,5
5	80	75,8	+5,5	16	74	72	+2,8
	95	93,4	+1,7		14,3	15	+4,7
8	92	85,8	+7,2	17	63	63,3	0
	96	97,5	-1,5		12	12	0
11	95	89,5	+7,2	18	25,5	24,5	+4,1
	98	97	+1,0		102	101,2	+1,0
14	102,5	94,8	+8,0	19	21,5	21	+2,5
	99	96,7	+2,4		87	89	-2,25

этих поверхностей некоторого коэффициента эффективности $K < 1$.

Зная размеры обмоток модели, мы, исходя из опытов 16, 17 и 1 и пользуясь формулой (8), вычислили эффективные поверхности $S_{ВН}$ и $S_{НН}$ и коэффициенты теплообмена λ и λ_0 .

Вставляя найденные таким образом значения λ и λ_0 в соотношения (7) для различных режимов табл. 1, произведя вычисления по формуле (8) или кривой рис. 2 и сравнивая их с результатами опыта, получаем табл. 2.

Табл. 2 показывает, что установленные формулы учета взаимного влияния источников тепла друг на друга и формула расчета нагрева (среднего по сопротивлению) обмоток дают удовлетворительные результаты.

Были также проведены 17 режимов нагрузки на другой модели, отличающейся от первой только высотой обмоток: она в два раза больше, чем в первой. Применение тех же формул дало не менее удовлетворительные результаты.

Интересно отметить, что отношение коэффициентов эффективности поверхностей обмоток второй и первой моделей оказалось

$$\frac{K_2}{K_1} = 0,836 \approx \frac{1}{\sqrt{2}},$$

т. е., как указывает и М. Видмар, обратно пропорционально корню четвертой степени высоты каналов, а $\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \approx \sqrt{2}$.

Дальнейшие исследования должны дать возможность установить для цилиндрических обмоток соотношения, выражающие зависимость K , λ и λ_0 от размеров каналов (ширины и высоты).

Литература

1. Г. Н. Петров. О нагревании катушек, обтекаемых током. Вестник электротехники, № 2, 1930.
2. М. Видмар. Трансформаторы. ГОНТИ, 1931.



Диэлектрические потери в пропитанной бумаге при малых градиентах

Кандидат техн. наук М. Г. ГЕРЦЕНШТЕЙН

Завод Министерства электропромышленности СССР

При изучении диэлектрических потерь в пропитанной бумажной изоляции обычно определяется зависимость $\lg \delta$ от температуры ϑ и от градиента электрического поля E .

Кривая $\lg \delta = f(\vartheta)$ в большинстве случаев снимается при градиенте, близком к рабочему, в области температур, при которых пропиточный состав находится в жидком состоянии. Эта кривая представляет интерес при оценке качества применяемых материалов, так как при указанных температурах $\lg \delta$ в основном определяется ионной проводимостью диэлектрика, зависящей от количества содержащихся в нем загрязнений.

Кривая $\lg \delta = f(E)$ в основном характеризует качество технологического процесса, а именно — полноту удаления газовых включений из изоляции. Эта характеристика, часто называемая ионизационной, обычно снимается при градиентах, минимальное значение которых равно приблизительно половине рабочего, т. е. при 2—3 кВ/мм, и выше, и при температурах, при которых пропиточный состав настолько вязок, что проводимость изоляции не может увеличиваться за счет расщепления молекул жидкости ударами движущихся ионов.

Существенный интерес для углубленного изучения пропитанной бумажной изоляции представляют измерения $\lg \delta$ при значительно меньших градиентах.

На рис. 1 представлены кривые зависимости $\lg \delta$ от напряжения при различных температурах, снятые на плоском конденсаторе в интер-

вале напряжений от 25 до 1 000 В, которым соответствуют градиенты от 105 до 4 285 В/мм. Диэлектрик конденсатора был изготовлен из конденсаторной бумаги толщиной 0,01 мм, пропитанной хорошо очищенным легким минеральным маслом, которое обычно применяется при изготовлении маслонаполненных кабелей и высоковольтных конденсаторов. Это масло при 90°С и градиенте постоянного поля 1 кВ/мм имело удельное сопротивление выше 10^{14} Ом·см.

На рис. 2 представлены аналогичные кривые, снятые на таком же конденсаторе, но после старения свыше 6 мес. при градиенте 25 кВ/мм. За исключением кривой для 30°С, остальные имеют максимумы, выраженные тем резче, чем выше температура; с увеличением температуры максимумы сдвигаются влево.

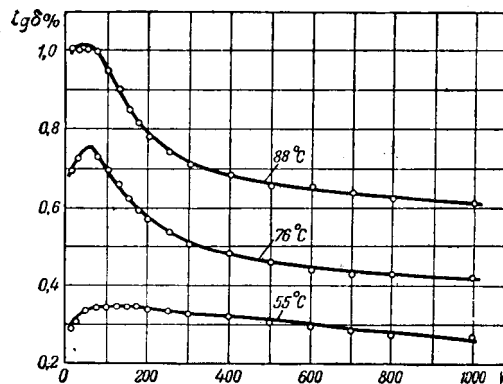


Рис. 1.

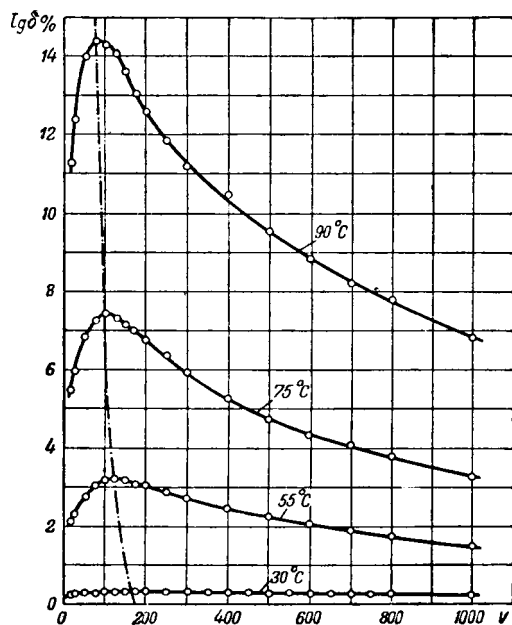


Рис. 2.

Кривые рис. 3 получены на конденсаторе, который, в отличие от предыдущих, был залит дипольной жидкостью — соволом (невысокой степени очистки). Как видно, характер кривых $\text{tg } \delta = f(U)$ при малых градиентах не зависит от того, пропитана бумага дипольной или нейтральной жидкостью.

Физическое объяснение подобных кривых сводится к следующему: в пропитанной бумаге имеются внутренние поры, а между слоями бумаги — зазоры; в жидкости, заполняющей эти весьма малые промежутки, имеются свободные ионы, которые, следуя за направлением переменного электрического поля, совершают колебательные движения. Амплитуда колебания пропорциональна величине приложенного напряжения, так как скорость движения иона в жидкости пропорциональна напряженности поля. Это имеет место, пока амплитуда колебаний меньше среднего диаметра промежутков, так как их стенки ограничивают путь колебания находящихся внутри них свободных ионов. На движение иона в жидкости вследствие трения затрачивается работа.

Если бы с ростом напряжения число ионов не увеличивалось, то $\text{tg } \delta$ был бы постоянным до тех пор, пока амплитуда колебания пропорциональна напряжению, так как $\text{tg } \delta$ определяется отношением активной мощности к реактивной; как активная, так и реактивная мощность увеличивалась бы в одинаковой степени — пропорционально квадрату напряжения. Начиная с напряжения, при котором амплитуда колебания ионов становится равной диаметру промежутков, $\text{tg } \delta$ должен уменьшаться, так как затрачиваемая на колебания энергия становится постоянной, а реактивная мощность конденсатора продолжает расти пропорционально квадрату напряжения.

Увеличение $\text{tg } \delta$ с ростом напряжения мож-

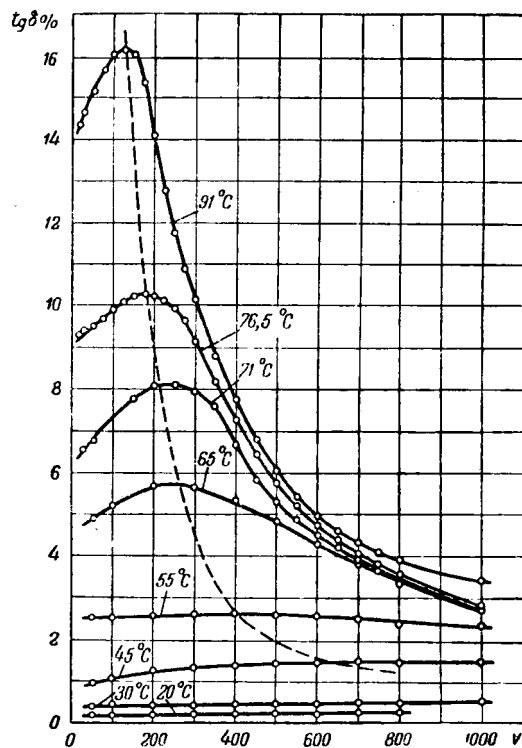


Рис. 3.

но объяснить только увеличением расхода энергии на колебания ионов за счет увеличения их числа. Чем выше напряженность поля, тем меньше число рекомбинирующих в единицу времени ионов и тем больше число свободных ионов, так как при определенной температуре число диссоциирующих молекул постоянно.

Следовательно, с увеличением напряжения $\text{tg } \delta$ сначала растет за счет увеличения числа свободных ионов, а затем, пройдя максимум, начинает уменьшаться, так как преобладающее значение получает барьерное действие стенок промежутков, механизм которого отличается от механизма барьерного действия бумаги при прохождении ионов от электрода к электроду [Л. 2].

Значительный рост $\text{tg } \delta$ вначале и сильное падение $\text{tg } \delta$ при дальнейшем повышении напряжения говорят о том, что в области высоких температур и малых градиентов диэлектрические потери в значительной мере определяются затратой энергии на колебания ионов. Уменьшение $\text{tg } \delta$ с понижением температуры вызвано тем, что за счет уменьшения тепловой диссоциации уменьшается число свободных ионов.

Из изложенного ясно, что для того, чтобы путь колебания ионов стал равен среднему диаметру промежутков, напряжение U_k , соответствующее максимуму $\text{tg } \delta$, должно быть тем выше, чем больше вязкость жидкости, т. е. чем меньше ее температура; этим и объясняются сдвиги $\text{tg } \delta_{\text{max}}$ с изменением температуры изоляции.

Для конденсаторов, изготовленных из одной бумаги и пропитанных жидкостью одной вязкости, но разной степени загрязненности, были получены разные кривые $\text{tg } \delta = f(U)$, но для

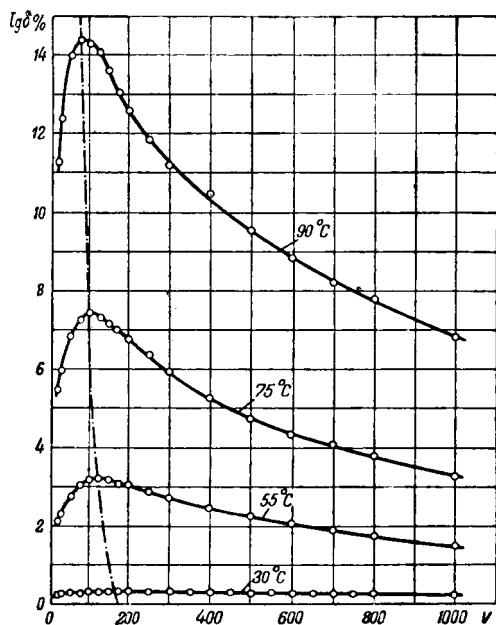


Рис. 2.

Кривые рис. 3 получены на конденсаторе, который, в отличие от предыдущих, был залит дипольной жидкостью — соволом (невысокой степени очистки). Как видно, характер кривых $\text{tg } \delta = f(U)$ при малых градиентах не зависит от того, пропитана бумага дипольной или нейтральной жидкостью.

Физическое объяснение подобных кривых сводится к следующему: в пропитанной бумаге имеются внутренние поры, а между слоями бумаги — зазоры; в жидкости, заполняющей эти весьма малые промежутки, имеются свободные ионы, которые, следуя за направлением переменного электрического поля, совершают колебательные движения. Амплитуда колебания пропорциональна величине приложенного напряжения, так как скорость движения иона в жидкости пропорциональна напряженности поля. Это имеет место, пока амплитуда колебаний меньше среднего диаметра промежутков, так как их стенки ограничивают путь колебания находящихся внутри них свободных ионов. На движение иона в жидкости вследствие трения затрачивается работа.

Если бы с ростом напряжения число ионов не увеличивалось, то $\text{tg } \delta$ был бы постоянным до тех пор, пока амплитуда колебания пропорциональна напряжению, так как $\text{tg } \delta$ определяется отношением активной мощности к реактивной; как активная, так и реактивная мощность увеличивалась бы в одинаковой степени — пропорционально квадрату напряжения. Начиная с напряжения, при котором амплитуда колебания ионов становится равной диаметру промежутков, $\text{tg } \delta$ должен уменьшаться, так как затрачиваемая на колебания энергия становится постоянной, а реактивная мощность конденсатора продолжает расти пропорционально квадрату напряжения.

Увеличение $\text{tg } \delta$ с ростом напряжения мож-

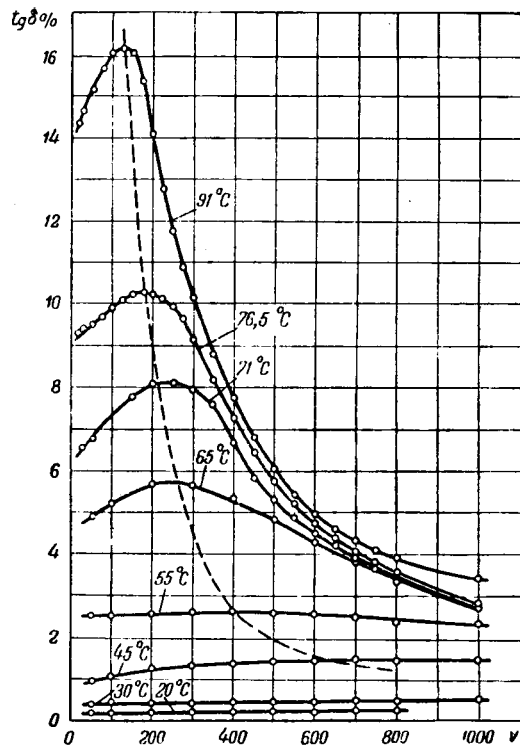


Рис. 3.

но объяснить только увеличением расхода энергии на колебания ионов за счет увеличения их числа. Чем выше напряженность поля, тем меньше число рекомбинирующих в единицу времени ионов и тем больше число свободных ионов, так как при определенной температуре число диссоциирующих молекул постоянно.

Следовательно, с увеличением напряжения $\text{tg } \delta$ сначала растет за счет увеличения числа свободных ионов, а затем, пройдя максимум, начинает уменьшаться, так как преобладающее значение получает барьерное действие стенок промежутков, механизм которого отличается от механизма барьерного действия бумаги при прохождении ионов от электрода к электроду [Л. 2].

Значительный рост $\text{tg } \delta$ вначале и сильное падение $\text{tg } \delta$ при дальнейшем повышении напряжения говорят о том, что в области высоких температур и малых градиентов диэлектрические потери в значительной мере определяются затратой энергии на колебания ионов. Уменьшение $\text{tg } \delta$ с понижением температуры вызвано тем, что за счет уменьшения тепловой диссоциации уменьшается число свободных ионов.

Из изложенного ясно, что для того, чтобы путь колебания ионов стал равен среднему диаметру промежутков, напряжение U_k , соответствующее максимуму $\text{tg } \delta$, должно быть тем выше, чем больше вязкость жидкости, т. е. чем меньше ее температура; этим и объясняются сдвиги $\text{tg } \delta_{\text{max}}$ с изменением температуры изоляции.

Для конденсаторов, изготовленных из одной бумаги и пропитанных жидкостью одной вязкости, но разной степени загрязненности, были получены разные кривые $\text{tg } \delta = f(U)$, но для

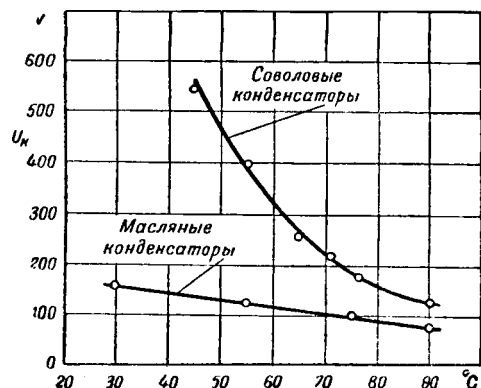


Рис. 4.

всех них напряжение U_k при данной температуре одинаково, так как эта величина зависит только от диаметра промежутков и вязкости пропитывающей жидкости и не зависит от количества содержащихся в ней ионов. Эта закономерность была установлена как на масляных, так и на соволовых конденсаторах (рис. 4).

Можно ожидать, что если бы вместо конденсаторной была применена более толстая бумага, например телефонная или кабельная, то при той же температуре и вязкости пропитывающей жидкости по мере увеличения толщины бумаги максимумы $\text{tg } \delta$ сдвинулись бы вправо, так как U_k должно расти с увеличением среднего диаметра промежутков. Величины $\text{tg } \delta_{\max}$ также могут дать указание на особенности строения бумаг, так как они зависят от среднего диаметра и от числа промежутков, в которых происходят колебания ионов.

Представленные кривые были получены на плоских конденсаторах, у которых электрическое поле однородно. У высоковольтных кабелей с отдельно освинцованными фазами электрическое поле от жилы к оболочке изменяется по показательному закону. Поэтому даже при применении одной бумаги кривые $\text{tg } \delta = f(U)$, снятые при малых градиентах, должны измениться, так как каждое измеренное значение $\text{tg } \delta$ будет отражать интегральную величину разных фаз колебательного процесса в разных порах и капиллярах.

Если сопоставить рис. 1 и 2, то видно, что у постаревшего масляного конденсатора величины $\text{tg } \delta_{\max}$ оказались значительно большими, чем у неработавшего.

В таблице сопоставлены величины $\text{tg } \delta_{\max}$, полученные при 70°C на нескольких соволовых конденсаторах, и величины $\text{tg } \delta$ при градиенте 15 kV/mm , измеренные при той же температуре.

Величины $\text{tg } \delta_{\max}$, а следовательно, и вообще величины $\text{tg } \delta$ при малых градиентах чувствительнее к загрязнению (содержанию ионов), чем величины $\text{tg } \delta$, измеренные при рабочих градиентах. При этом безразлично, вызвано ли наличие ионов применением загрязненной бумаги или применением загрязненной жидкости, старением под влиянием температуры или под воздей-

№ конденсатора	$\text{tg } \delta_{\max}, \%$	$\text{tg } \delta$ при 15 kV/mm
1	0,76	0,24
2	2,58	0,36
3	6,40	0,76
4	7,75	0,87

ствием больших градиентов, или же совместным действием обоих этих факторов.

При изучении качества изготовленной продукции, а также старения ее изоляции, характеристики $\text{tg } \delta = f(E)$, снятые при высоких температурах и малых градиентах, должны быть весьма показательны. Например, при ускоренном испытании кабелей на старение [Л. 2] для периодической проверки качества их изоляции весьма целесообразно прибегнуть к снятию вышеуказанных характеристик [Л. 3].

Эти характеристики также можно с успехом использовать при изучении строения бумажной изоляции. Структура бумаги влияет на электрическую прочность изоляции и на ее барьерное действие при движении ионов от электрода к электроду. Структура также оказывает немалое влияние на капиллярные свойства бумаги, от которых зависят полнота пропитки и удержание пропиточного состава в изоляции. Последнее, например, важно для кабелей, прокладываемых по наклонным трассам. Тот тип бумаги, который дает наивысшую электрическую прочность, обуславливает в то же время наименьший угол потерь и наибольшую теплопроводность бумаги [Л. 4], т. е. как раз те качества, которые особенно ценны в кабеле или конденсаторе.

К сожалению, до настоящего времени структурные характеристики изоляционных бумаг, а также их влияние на электрические и тепловые характеристики пропитанной бумажной изоляции, изучены недостаточно.

Измерение объемного веса и воздухопроницаемости бумаги помогает несколько уяснить ее строение. Иногда высказывается мнение, что сама по себе воздухопроницаемость достаточно характеризует строение бумаги. Это неверно, так как бумаги двух разных структур могут иметь одинаковую воздухопроницаемость.

Кривые $\text{tg } \delta = f(U)$, снятые на пропитанной бумаге при высоких температурах и при малых градиентах, как было изложено, зависят от числа и размеров ее пор и капилляров, а поэтому могут оказаться полезными при изучения строения изоляционных бумаг.

Литература

1. М. Г. Герценштейн. Пропитывающая масса для силовых кабелей. Электричество, № 23, 1935.
2. D. W. Roper. Trans. AIEE, № 3—4, стр. 1058, 1933.
3. C. F. Pross. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques. Доклад № 216, 1946.
4. T. N. Riley, T. R. Scott. JIEE, т. 67, № 392, стр. 946, 1929.

К расчету неустановившегося режима в цепных схемах

доктор техн. наук, проф. К. М. ПОЛИВАНОВ и кандидат техн. наук Б. И. ЯХИНСОН

Московский энергетический институт им. Молотова

1. В электротехнических устройствах встречаются цепные схемы, состоящие из ряда одинаковых последовательно (в каскад) соединенных четырехполюсников. На рис. 1 показаны первый, второй и n -й элементы такой схемы.

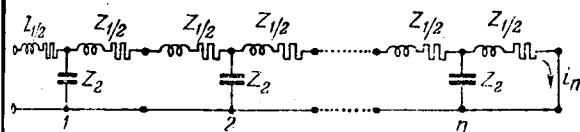


Рис. 1.

Для анализа работы таких схем в ряде случаев нужно уметь вычислить ток i_n на выходе последнего короткозамкнутого четырехполюсника при включении входного напряжения (u_1). Такая задача может быть решена, если известна взаимная переходная проводимость $A_n(t)$, определяемая как ток на выходе (i_n) при включении на вход единичного напряжения ($u_1 = 0$ при $t < 0$ и $u_1 = 1$ при $t \geq 0$).

Для случая, когда $Z_1 = R + Lp$ и $Z_2 = \frac{1}{Cp}$,

имеем:

$$A_n(t) = \frac{1}{nR} \left[1 - \exp\left(-\frac{Rt}{L}\right) \right] + \frac{1}{nL} \exp\left(-\frac{Rt}{2L}\right) \left\{ 2 \sum_{m=1}^{n-1} \frac{\sin(\beta_m t + m\pi)}{\beta_m} + \frac{\sin(\beta_n t + n\pi)}{\beta_n} \right\}, \quad (1)$$

$$\beta_m = \sqrt{\frac{2}{CL} \left(1 - \cos \frac{m\pi}{n} \right) - \frac{R^2}{4L^2}}.$$

Когда $L \rightarrow 0$, т. е. при $Z_1 = R$ и $Z_2 = \frac{1}{Cp}$,

имеем:

$$A_n(t) = \frac{1}{nR} \left\{ 1 + 2 \sum_{m=1}^{n-1} (-1)^m \exp \left[\frac{2}{CR} \left(\cos \frac{m\pi}{n} - 1 \right) t \right] + (-1)^n \exp \left(-\frac{4t}{CR} \right) \right\}. \quad (2)$$

Выражения (1) и (2) могут быть получены достаточно просто путем применения к цепной схеме уравнений «линии с распределенными постоянными» и их решения по правилам операционного исчисления.

Однако, нам не известна ни одна работа, где были бы приведены решения (1) и (2). Напротив, в популярной монографии Когена [Л. 1], на которую имеется много ссылок, и в прекрасной

монографии Эфроса и Данилевского [Л. 2] приведены ошибочные результаты¹. Известны также правильные решения Малета [Л. 3], однако они даны для частных случаев двух- и трехзвенных цепей, а при том методе, которым пользовался Малет, они не могут быть обобщены на случай n -звенной цепи.

Решение Карсона [Л. 4] дано для тока в любом звене бесконечной цепочки. В более поздней литературе [Л. 5–7] мы также не встречали решения задачи для цепочки из конечного числа (n) звеньев при нестационарном режиме.

2. В уравнении одного четырехполюсника

$$U_1 = U_2 \operatorname{ch} \gamma + I_2 Z_c \operatorname{sh} \gamma,$$

$$I_1 = \frac{U_2}{Z_c} \operatorname{sh} \gamma + I_2 \operatorname{ch} \gamma; \quad (3)$$

для данной Т-образной схемы (рис. 1)

$$\operatorname{ch} \gamma = 1 + \frac{Z_1}{2Z_2}, \quad (4)$$

$$\frac{\operatorname{sh} \gamma}{Z_c} = \frac{1}{Z_2}. \quad (5)$$

¹ Решения, приведенные Когеном, Эфросом и Данилевским, в обозначениях, принятых в формулах (1) и (2), записываются так:

$$A(t) = \frac{1}{nR} \left[1 - \exp\left(-\frac{Rt}{L}\right) \right] + \frac{1}{nL} \exp\left(-\frac{Rt}{2L}\right) \left\{ 2 \sum_{m=1}^n \sin \frac{(\beta_m t + m\pi)}{\beta_m} \right\} \quad (1a)$$

и для $L \rightarrow 0$

$$A(t) = \frac{1}{nR} \left\{ 1 + 2 \sum_{m=1}^n (-1)^m \exp \left[\frac{2}{CR} \left(\cos \frac{m\pi}{n} - 1 \right) t \right] \right\}, \quad (2a)$$

Отличие (1a) и (2a) от (1) и (2) заключается в том, что последний член формул (1) и (2) также множится на 2 и поэтому ошибочно вводится под знак \sum , распространяемой на все n слагаемых. Ошибочность выражений (1a) и (2a) может быть показана и без проверки вывода. Особенно очевидна ошибочность результата при $L = 0$. Действительно, из (2a) получаем, что в последнем короткозамкнутом звене в момент $t = 0$ ток скачком возрастает до конечного значения:

$$A(0) = \frac{1}{nR} \left\{ 1 + 2 \sum_{m=1}^n (-1)^m \right\} = \begin{cases} \frac{1}{nR} & \text{при четном } n \\ -\frac{1}{nR} & \text{при нечетном } n, \end{cases}$$

что невозможно вследствие шунтирующего действия емкостей; очевидна и невозможность зависимости направления тока от четности и нечетности числа звеньев.

К расчету неустановившегося режима в цепных схемах

доктор техн. наук, проф. К. М. ПОЛИВАНОВ и кандидат техн. наук Б. И. ЯХИНСОН

Московский энергетический институт им. Молотова

1. В электротехнических устройствах встречаются цепные схемы, состоящие из ряда одинаковых последовательно (в каскад) соединенных четырехполюсников. На рис. 1 показаны первый, второй и n -й элементы такой схемы.

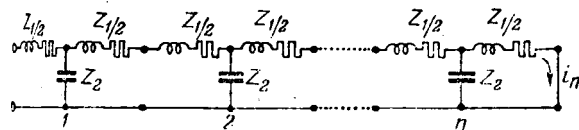


Рис. 1.

Для анализа работы таких схем в ряде случаев нужно уметь вычислить ток i_n на выходе последнего короткозамкнутого четырехполюсника при включении входного напряжения (u_1). Такая задача может быть решена, если известна взаимная переходная проводимость $A_n(t)$, определяемая как ток на выходе (i_n) при включении на вход единичного напряжения ($u_1 = 0$ при $t < 0$ и $u_1 = 1$ при $t \geq 0$).

Для случая, когда $Z_1 = R + Lp$ и $Z_2 = \frac{1}{Cp}$, имеем:

$$A_n(t) = \frac{1}{nR} \left[1 - \exp\left(-\frac{Rt}{L}\right) \right] + \frac{1}{nL} \exp\left(-\frac{Rt}{2L}\right) \left\{ 2 \sum_{m=1}^{n-1} \frac{\sin(\beta_m t + m\pi)}{\beta_m} + \frac{\sin(\beta_n t + n\pi)}{\beta_n} \right\}, \quad (1)$$

$$\beta_m = \sqrt{\frac{2}{CL} \left(1 - \cos \frac{m\pi}{n} \right) - \frac{R^2}{4L^2}}.$$

Когда $L \rightarrow 0$, т. е. при $Z_1 = R$ и $Z_2 = \frac{1}{Cp}$, имеем:

$$A_n(t) = \frac{1}{nR} \left\{ 1 + 2 \sum_{m=1}^{n-1} (-1)^m \exp \left[\frac{2}{CR} \left(\cos \frac{m\pi}{n} - 1 \right) t \right] + (-1)^n \exp \left(-\frac{4t}{CR} \right) \right\}. \quad (2)$$

Выражения (1) и (2) могут быть получены достаточно просто путем применения к цепной схеме уравнений «линии с распределенными постоянными» и их решения по правилам операционного исчисления.

Однако, нам не известна ни одна работа, где были бы приведены решения (1) и (2). Напротив, в популярной монографии Когена [Л. 1], на которую имеется много ссылок, и в прекрасной

монографии Эфроса и Данилевского [Л. 2] приведены ошибочные результаты¹. Известны также правильные решения Малета [Л. 3], однако они даны для частных случаев двух- и трехзвенных цепей, а при том методе, которым пользовался Малет, они не могут быть обобщены на случай n -звенной цепи.

Решение Карсона [Л. 4] дано для тока в любом звене бесконечной цепочки. В более поздней литературе [Л. 5—7] мы также не встречали решения задачи для цепочки из конечного числа (n) звеньев при нестационарном режиме.

2. В уравнении одного четырехполюсника

$$U_1 = U_2 \operatorname{ch} \gamma + I_2 Z_c \operatorname{sh} \gamma, \\ I_1 = \frac{U_2}{Z_c} \operatorname{sh} \gamma + I_2 \operatorname{ch} \gamma; \quad (3)$$

для данной Т-образной схемы (рис. 1)

$$\operatorname{ch} \gamma = 1 + \frac{Z_1}{2Z_2}, \quad (4)$$

и

$$\frac{\operatorname{sh} \gamma}{Z_c} = \frac{1}{Z_2}. \quad (5)$$

¹ Решения, приведенные Когеном, Эфросом и Данилевским, в обозначениях, принятых в формулах (1) и (2), записываются так:

$$A(t) = \frac{1}{nR} \left[1 - \exp\left(-\frac{Rt}{L}\right) \right] + \frac{1}{nL} \exp\left(-\frac{Rt}{2L}\right) \left\{ 2 \sum_{m=1}^n \sin \frac{(\beta_m t + m\pi)}{\beta_m} \right\} \quad (1a)$$

и для $L \rightarrow 0$

$$A(t) = \frac{1}{nR} \left\{ 1 + 2 \sum_{m=1}^n (-1)^m \exp \left[\frac{2}{CR} \left(\cos \frac{m\pi}{n} - 1 \right) t \right] \right\}, \quad (2a)$$

Отличие (1a) и (2a) от (1) и (2) заключается в том, что последний член формул (1) и (2) также множится на 2 и поэтому ошибочно вводится под знак \sum , распространяемой на все n слагаемых. Ошибочность выражений (1a) и (2a) может быть показана и без проверки вывода. Особенно очевидна ошибочность результата при $L = 0$. Действительно, из (2a) получаем, что в последнем короткозамкнутом звене в момент $t = 0$ ток скачком возрастает до конечного значения:

$$A(0) = \frac{1}{nR} \left\{ 1 + 2 \sum_{m=1}^n (-1)^m \right\} = \begin{cases} \frac{1}{nR} & \text{при четном } n \\ -\frac{1}{nR} & \text{при нечетном } n \end{cases}$$

что невозможно вследствие шунтирующего действия емкостей; очевидна и невозможность зависимости направления тока от четности и нечетности числа звеньев.

К расчету неустановившегося режима в цепных схемах

доктор техн. наук, проф. К. М. ПОЛИВАНОВ и кандидат техн. наук Б. И. ЯХИНСОН

Московский энергетический институт им. Молотова

1. В электротехнических устройствах встречаются цепные схемы, состоящие из ряда одинаковых последовательно (в каскад) соединенных четырехполюсников. На рис. 1 показаны первый, второй и n -й элементы такой схемы.

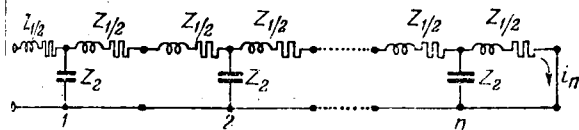


Рис. 1.

Для анализа работы таких схем в ряде случаев нужно уметь вычислить ток i_n на выходе последнего короткозамкнутого четырехполюсника при включении входного напряжения (u_1). Такая задача может быть решена, если известна взаимная переходная проводимость $A_n(t)$, определяемая как ток на выходе (i_n) при включении на вход единичного напряжения ($u_1 = 0$ при $t < 0$ и $u_1 = 1$ при $t \geq 0$).

Для случая, когда $Z_1 = R + Lp$ и $Z_2 = \frac{1}{Cp}$, имеем:

$$A_n(t) = \frac{1}{nR} \left[1 - \exp\left(\frac{-Rt}{L}\right) \right] + \frac{1}{nL} \exp\left(\frac{-Rt}{2L}\right) \left\{ 2 \sum_{m=1}^{n-1} \frac{\sin(\beta_m t + m\pi)}{\beta_m} + \frac{\sin(\beta_n t + n\pi)}{\beta_n} \right\}, \quad (1)$$

$$\beta_m = \sqrt{\frac{2}{CL} \left(1 - \cos \frac{m\pi}{n} \right) - \frac{R^2}{4L^2}}.$$

Когда $L \rightarrow 0$, т. е. при $Z_1 = R$ и $Z_2 = \frac{1}{Cp}$, имеем:

$$A_n(t) = \frac{1}{nR} \left\{ 1 + 2 \sum_{m=1}^{n-1} (-1)^m \exp \left[\frac{2}{CR} \left(\cos \frac{m\pi}{n} - 1 \right) t \right] + (-1)^n \exp \left(\frac{-4t}{CR} \right) \right\}. \quad (2)$$

Выражения (1) и (2) могут быть получены достаточно просто путем применения к цепной схеме уравнений «линии с распределенными постоянными» и их решения по правилам операционного исчисления.

Однако, нам не известна ни одна работа, где были бы приведены решения (1) и (2). Напротив, в популярной монографии Когена [Л. 1], на которую имеется много ссылок, и в прекрасной

монографии Эфроса и Данилевского [Л. 2] приведены ошибочные результаты¹. Известны также правильные решения Малета [Л. 3], однако они даны для частных случаев двух- и трехзвенных цепей, а при том методе, которым пользовался Малет, они не могут быть обобщены на случай n -звенной цепи.

Решение Карсона [Л. 4] дано для тока в любом звене бесконечной цепочки. В более поздней литературе [Л. 5—7] мы также не встречали решения задачи для цепочки из конечного числа (n) звеньев при нестационарном режиме.

2. В уравнении одного четырехполюсника

$$U_1 = U_2 \operatorname{ch} \gamma + I_2 Z_c \operatorname{sh} \gamma, \\ I_1 = \frac{U_2}{Z_c} \operatorname{sh} \gamma + I_2 \operatorname{ch} \gamma; \quad (3)$$

для данной Т-образной схемы (рис. 1)

$$\operatorname{ch} \gamma = 1 + \frac{Z_1}{2Z_2} \quad (4)$$

и

$$\frac{\operatorname{sh} \gamma}{Z_c} = \frac{1}{Z_2}. \quad (5)$$

¹ Решения, приведенные Когеном, Эфросом и Данилевским, в обозначениях, принятых в формулах (1) и (2), записываются так:

$$A(t) = \frac{1}{nR} \left[1 - \exp\left(\frac{-Rt}{L}\right) \right] + \frac{1}{nL} \exp\left(\frac{-Rt}{2L}\right) \left\{ 2 \sum_{m=1}^n \sin \frac{(\beta_m t + m\pi)}{\beta_m} \right\} \quad (1a)$$

и для $L \rightarrow 0$

$$A(t) = \frac{1}{nR} \left\{ 1 + 2 \sum_{m=1}^n (-1)^m \exp \left[\frac{2}{CR} \left(\cos \frac{m\pi}{n} - 1 \right) t \right] \right\}, \quad (2a)$$

Отличие (1a) и (2a) от (1) и (2) заключается в том, что последний член формул (1) и (2) также множится на 2 и поэтому ошибочно вводится под знак \sum , распространяемой на все n слагаемых. Ошибочность выражений (1a) и (2a) может быть показана и без проверки вывода. Особенно очевидна ошибочность результата при $L = 0$. Действительно, из (2a) получаем, что в последнем короткозамкнутом звене в момент $t = 0$ ток скачком возрастает до конечного значения:

$$A(0) = \frac{1}{nR} \left\{ 1 + 2 \sum_{m=1}^n (-1)^m \right\} = \begin{cases} \frac{1}{nR} & \text{при четном } n \\ -\frac{1}{nR} & \text{при нечетном } n \end{cases}$$

что невозможно вследствие шунтирующего действия емкостей; очевидна и невозможность зависимости направления тока от четности и нечетности числа звеньев.

К расчету неустановившегося режима в цепных схемах

Доктор техн. наук, проф. К. М. ПОЛИВАНОВ и кандидат техн. наук Б. И. ЯХИНСОН

Московский энергетический институт им. Молотова

1. В электротехнических устройствах встречаются цепные схемы, состоящие из ряда одинаковых последовательно (в каскад) соединенных четырехполюсников. На рис. 1 показаны первый, второй и n -й элементы такой схемы.

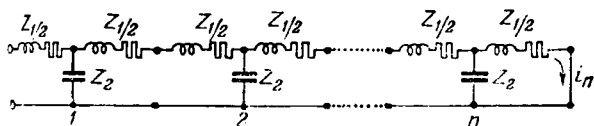


Рис. 1.

Для анализа работы таких схем в ряде случаев нужно уметь вычислить ток i_n на выходе последнего короткозамкнутого четырехполюсника при включении входного напряжения (u_1). Такая задача может быть решена, если известна переходная проводимость $A_n(t)$, определяемая как ток на выходе (i_n) при включении на вход единичного напряжения ($u_1 = 0$ при $t < 0$ и $u_1 = 1$ при $t \geq 0$).

Для случая, когда $Z_1 = R + Lp$ и $Z_2 = \frac{1}{Cp}$,

имеем:

$$A_n(t) = \frac{1}{nR} \left[1 - \exp\left(-\frac{Rt}{L}\right) \right] + \frac{1}{nL} \exp\left(-\frac{Rt}{2L}\right) \left\{ 2 \sum_{m=1}^{n-1} \frac{\sin(\beta_m t + m\pi)}{\beta_m} + \frac{\sin(\beta_n t + n\pi)}{\beta_n} \right\}, \quad (1)$$

$$\text{где } \beta_m = \sqrt{\frac{2}{CL} \left(1 - \cos \frac{m\pi}{n} \right) - \frac{R^2}{4L^2}}.$$

Когда $L \rightarrow 0$, т. е. при $Z_1 = R$ и $Z_2 = \frac{1}{Cp}$,

имеем:

$$A_n(t) = \frac{1}{nR} \left\{ 1 + 2 \sum_{m=1}^{n-1} (-1)^m \exp \left[\frac{2}{CR} \left(\cos \frac{m\pi}{n} - 1 \right) t \right] + (-1)^n \exp \left(-\frac{4t}{CR} \right) \right\}. \quad (2)$$

Выражения (1) и (2) могут быть получены достаточно просто путем применения к цепной схеме уравнений «линии с распределенными параметрами» и их решения по правилам операционного исчисления.

Однако, нам не известна ни одна работа, где были бы приведены решения (1) и (2). Напротив, в популярной монографии Когена [Л. 1], на которую имеется много ссылок, и в прекрасной

монографии Эфроса и Данилевского [Л. 2] приведены ошибочные результаты¹. Известны также правильные решения Малета [Л. 3], однако они даны для частных случаев двух- и трехзвенных цепей, а при том методе, которым пользовался Малет, они не могут быть обобщены на случай n -звенной цепи.

Решение Карсона [Л. 4] дано для тока в любом звене бесконечной цепочки. В более поздней литературе [Л. 5—7] мы также не встречали решения задачи для цепочки из конечного числа (n) звеньев при нестационарном режиме.

2. В уравнении одного четырехполюсника

$$U_1 = U_2 \operatorname{ch} \gamma + I_2 Z_c \operatorname{sh} \gamma,$$

$$I_1 = \frac{U_2}{Z_c} \operatorname{sh} \gamma + I_2 \operatorname{ch} \gamma; \quad (3)$$

для данной Т-образной схемы (рис. 1)

$$\operatorname{ch} \gamma = 1 + \frac{Z_1}{2Z_2} \quad (4)$$

и

$$\frac{\operatorname{sh} \gamma}{Z_c} = \frac{1}{Z_2}. \quad (5)$$

¹ Решения, приведенные Когеном, Эфросом и Данилевским, в обозначениях, принятых в формулах (1) и (2), записываются так:

$$A(t) = \frac{1}{nR} \left[1 - \exp\left(-\frac{Rt}{L}\right) \right] + \frac{1}{nL} \exp\left(-\frac{Rt}{2L}\right) \left\{ 2 \sum_{m=1}^n \sin \frac{(\beta_m t + m\pi)}{\beta_m} \right\} \quad (1a)$$

и для $L \rightarrow 0$

$$A(t) = \frac{1}{nR} \left\{ 1 + 2 \sum_{m=1}^n (-1)^m \exp \left[\frac{2}{CR} \left(\cos \frac{m\pi}{n} - 1 \right) t \right] \right\}, \quad (2a)$$

Отличие (1a) и (2a) от (1) и (2) заключается в том, что последний член формул (1) и (2) также множится на 2 и поэтому ошибочно вводится под знак \sum , распространяемой на все n слагаемых. Ошибочность выражений (1a) и (2a) может быть показана и без проверки вывода. Особенно очевидна ошибочность результата при $L = 0$. Действительно, из (2a) получаем, что в последнем короткозамкнутом звене в момент $t = 0$ ток скачком возрастает до конечного значения:

$$A(0) = \frac{1}{nR} \left\{ 1 + 2 \sum_{m=1}^n (-1)^m \right\} = \begin{cases} \frac{1}{nR} & \text{при четном } n \\ -\frac{1}{nR} & \text{при нечетном } n, \end{cases}$$

что невозможно вследствие шунтирующего действия емкостей; очевидна и невозможность зависимости направления тока от четности и нечетности числа звеньев.

Для цепной схемы из n таких четырех- где
полюсников

$$U_1 = U_n \operatorname{ch} n\gamma + I_n Z_c \operatorname{sh} n\gamma,$$

$$I_1 = \frac{U_n}{Z_c} \operatorname{sh} n\gamma + I_n \operatorname{ch} n\gamma, \quad (6)$$

где U_n и I_n — напряжение и ток на выходе цепочки.

При коротком замыкании выхода имеем $U_n = 0$ и, следовательно,

$$U_1 = I_n Z_c \operatorname{sh} n\gamma. \quad (7)$$

При $U_1 = 1$, принимая во внимание (5),

$$I_n = A_n(p) = \frac{1}{Z_c \operatorname{sh} n\gamma} = \frac{1}{Z_2 \operatorname{sh} \gamma \operatorname{sh} n\gamma} = \frac{1}{Z(p)}. \quad (8)$$

Переходную проводимость, как функцию времени $A_n(t) \doteq A_n(p)$, можно выразить, воспользовавшись формулой разложения Хевисайда²:

$$A_n(t) = \frac{1}{Z(0)} + \sum_k \frac{\exp(p_k t)}{\left[p \frac{\partial Z(p)}{\partial p} \right]_{p=p_k}}. \quad (9)$$

Для этого прежде всего нужно найти p_k — корни характеристического уравнения

$$Z(p) = Z_2 \operatorname{sh} \gamma \operatorname{sh} n\gamma = 0. \quad (10)$$

Последнее безусловно удовлетворяется при

$$\gamma = \gamma_m = j \frac{m\pi}{n},$$

где

$$m = 0, 1, \dots, n, n+1, \dots, l, \dots, \quad (11)$$

если при этих значениях γ величина $Z_2 = 1/Cp_k$ остается конечной. Для определения p_k , соответствующих $\gamma = \gamma_m$, можно воспользоваться (4):

$$\cos \frac{m\pi}{n} = 1 + \frac{1}{2} Cp_k(R + p_k L). \quad (12)$$

Заметим, что (12) представляет собой $n+1$ различных уравнений для определения p_k , получающихся при изменении m от 0 до n [для значений $m = n+i$ и $m = n-i$, если $i < n$, мы имеем одно уравнение (12); так же как при $m = 2n+i$ и при $m = i$ и т. д.³].

Таким образом,⁴ из (12) получается $2n$ корней для значений m от 1 до n :

$$p_m = -\alpha \pm j\beta_m, \quad (13)$$

² Непосредственно применимой в случае отсутствия кратных корней.

³ Таким образом, кратность корней γ для уравнения (10) не приводит к кратности корней p того же уравнения (10).

⁴ Выражение (12) можно написать в таком виде:

$$p^2 + p \frac{R}{L} + \frac{2}{CL} \left(1 - \cos \frac{m\pi}{n} \right) = 0.$$

$$\alpha = \frac{R}{2L} \quad \text{и} \quad \beta_m = \sqrt{\frac{2}{CL} \left(1 - \cos \frac{m\pi}{n} \right) - \frac{R^2}{4L^2}}$$

и один корень при $m=0$:

$$p_0 = -\frac{R}{L}. \quad (14)$$

Второе значение p , удовлетворяющее (12) при $m=0$, т. е. $p=0$, не обращает в нуль (10) и, следовательно, не является его корнем. Действительно,

$$Z(0) = \lim_{p \rightarrow 0} Z_2 \operatorname{sh} \gamma \operatorname{sh} n\gamma = nR, \quad (15)$$

что легко показать, вычисляя предел⁵ [пользуясь (4) и (12)] или просто имея в виду, что $Z(0)$ есть взаимное сопротивление выходной ветви относительно входа при установившемся режиме.

Вслед за определением корней для пользования формулой (9) нужно вычислить $\frac{p \partial Z(p)}{\partial p}$ при $p = p_k$. Дифференцируя $Z(p) = Z_2 \operatorname{sh} \gamma \operatorname{sh} n\gamma$ [см. (8)], находим:

$$p \frac{\partial Z(p)}{\partial p} = -\frac{1}{Cp} \operatorname{sh} \gamma \operatorname{sh} n\gamma + \frac{1}{C} \operatorname{ch} \gamma \frac{\partial \gamma}{\partial p} \operatorname{sh} n\gamma + \frac{1}{C} \operatorname{sh} \gamma n \operatorname{ch} n\gamma \frac{\partial \gamma}{\partial p} = a + b + c. \quad (16)$$

При всех значениях $p = p_k$ первое слагаемое обращается в нуль, а третье слагаемое

$$c = \frac{n}{2} (-1)^m (R + 2Lp_k), \quad (17)$$

так как

$$\operatorname{ch} n\gamma_m = (-1)^m,$$

а

$$\operatorname{sh} \gamma \frac{\partial \gamma}{\partial p} = \frac{\partial}{\partial p} \operatorname{ch} \gamma = \frac{\partial}{\partial p} \left[\frac{1}{2} Cp(R + Lp) \right] = \frac{C}{2} (R + 2Lp). \quad (18)$$

Для определения второго слагаемого выразим $\frac{\partial \gamma}{\partial p}$ из (18):

$$\frac{\partial \gamma}{\partial p} = \frac{C(R + 2Lp)}{2 \operatorname{sh} \gamma}. \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \lim_{p \rightarrow 0} Z_2 \operatorname{sh} \gamma \operatorname{sh} n\gamma &= \lim_{p \rightarrow 0} \frac{1}{Cp} n\gamma^2 = \\ &= \lim_{p \rightarrow 0} \frac{1}{Cp} nCp(R + Lp) = nR; \end{aligned}$$

значение γ^2 здесь выражено из (4) и (12) с учетом того что

$$\lim_{\gamma \rightarrow 0} (\operatorname{ch} \gamma - 1) = \left(1 + \frac{\gamma^2}{2} \right) - 1 = \frac{\gamma^2}{2}.$$

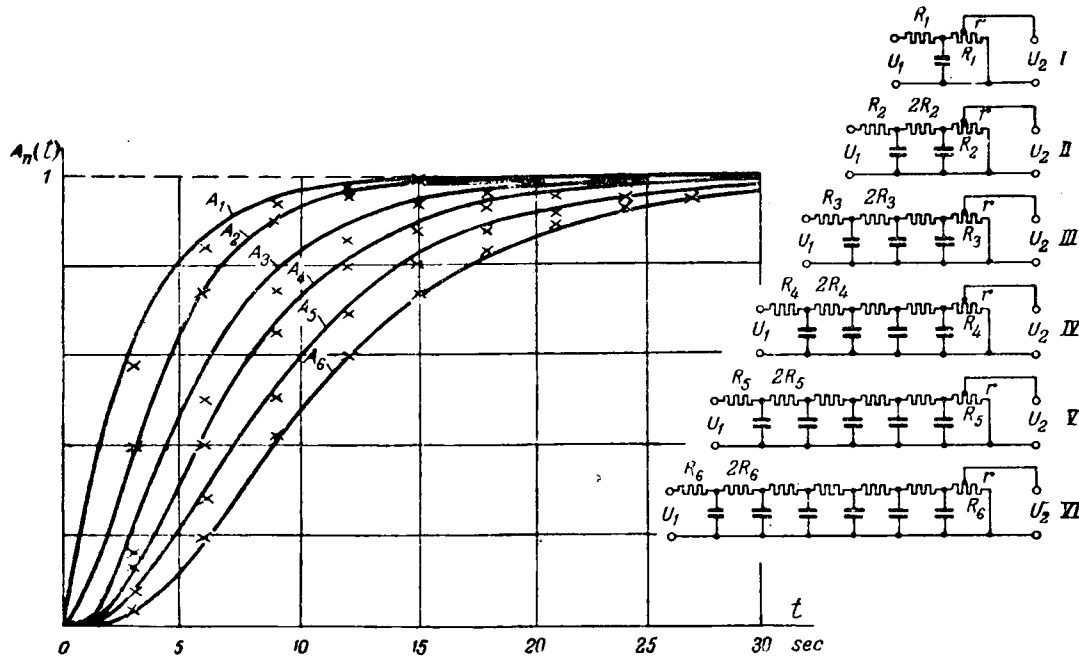


Рис. 2.

Тогда

$$b = -\frac{1}{C} \operatorname{ch} \gamma \frac{\partial \gamma}{\partial p} \operatorname{sh} n \gamma = \operatorname{ch} \gamma \frac{R + 2Lp}{2} \frac{\operatorname{sh} n \gamma}{\operatorname{sh} \gamma}. \quad (20)$$

При $\gamma = \gamma_m$ обращается в нуль $\operatorname{sh} n \gamma_m$, однако, это еще не значит, что b также обращается в нуль⁶. Действительно, при $m=0$, $\gamma_m=0$, а следовательно, обращается в нуль и знаменатель (20).

Раскрывая неопределенность и подставляя значение p_0 из (14), находим:

$$b_{m=0} = \frac{R + 2Lp_0}{2} n = -\frac{nR}{2}. \quad (21)$$

Также при $m=n$, когда $\gamma_n = j\pi$, имеем $\operatorname{sh} n \gamma_n = 0$ и $\operatorname{sh} \gamma_n = 0$.

Раскрывая неопределенность⁷, находим:

$$b_{m=n} = \frac{n}{2} (R + 2Lp_n) (-1)^n. \quad (22)$$

Таким образом, при $m=n$ имеем $b=c$. При всех остальных значениях m (от 1 до $n-1$) имеем $b_m=0$.

В итоге:

$$\left[p \frac{\partial Z(p)}{\partial p} \right]_{p=p_0} = -nR, \quad (23)$$

$$\left[p \frac{\partial Z(p)}{\partial p} \right]_{p=p_m} = \frac{n}{2} (-1)^m (R + 2Lp_m) \quad (24)$$

⁶ Если это не учитывать, т. е. полагать, что b всегда равно нулю, мы приходим к тому неверному решению, о котором говорилось раньше [Л. 1 и 2].

⁷ $\lim_{\alpha \rightarrow \pi} \frac{\operatorname{sh} jn\alpha}{\operatorname{sh} j\alpha} = \lim_{\alpha \rightarrow \pi} \frac{\sin n\alpha}{\sin \alpha} = n(-1)^n$.

при $m=1, 2, \dots, (n-1)$;

$$\left[p \frac{\partial Z(p)}{\partial p} \right]_{p=p_n} = n(-1)^n (R + 2Lp_n) \quad (25)$$

при $m=n$.

Еще раз заметим, что каждому из значений m от 1 до n соответствуют два значения корня $p_m = -\alpha \pm j\beta$.

Подставляя в формулу (9) найденные значения корней и производных $\frac{\partial Z(p)}{\partial p}$, получаем выражение (1).

Путем предельного перехода ($L \rightarrow 0$) или посредством совершенно аналогичных вычислений легко найти решение для случая $Z_1 = R$ и $Z_2 = \frac{1}{pC}$, которое и приведено выше [см. (2)].

3. Из общего выражения (2) легко найти значения переходной проводимости для $n=1, 2$ и т. д.:

$$A_1(t) = \frac{1}{R} \left[1 - \exp\left(-\frac{4t}{CR}\right) \right],$$

$$A_2(t) = \frac{1}{2R} \left[1 - 2 \exp\left(-\frac{2t}{CR}\right) + \exp\left(-\frac{4t}{CR}\right) \right], \quad (26)$$

$$A_3(t) = \frac{1}{3R} \left[1 - 2 \exp\left(-\frac{t}{CR}\right) + 2 \exp\left(-\frac{3t}{CR}\right) - \exp\left(-\frac{4t}{CR}\right) \right].$$

По этим формулам были построены характеристики ряда цепных схем. Экспериментальные данные, как и следовало ожидать, хорошо совпали с расчетными (на рис. 2 крестиками показаны экспериментальные результаты).

Зависимость характера нарастания тока i_n от числа звеньев хорошо видна из рис 2. Аналити-

чески это выражается тем, что в начальный момент ($t=0$) не только ток равен нулю, но и все производные до $(n-1)$ -й включительно

$$\left[\frac{\partial^k A_n(t)}{\partial t^k} \right]_{t=0} = 0 \quad (27)$$

при $k=0, 1 \dots (n-1)$. n -ая производная при $t=0$ отлична от нуля, причем

$$\left[\frac{\partial^n A_n(t)}{\partial t^n} \right]_{t=0} = \frac{4}{R(CR)^n}. \quad (28)$$

◇ ◇ ◇

Мостовые схемы и матричные преобразования

Проф. М. Л. ЦУККЕРМАН

Ленинградский институт точной механики и оптики

При анализе и расчете мостовых схем приходится составлять и решать ряд уравнений, пользуясь законами и правилами Кирхгофа, Максвелла, Тевенена. Когда мост уравновешен, то число уравнений сравнительно невелико. При решении же и исследовании ряда задач, в частности в области автоматики, необходимо оперировать с неуравновешенными мостовыми схемами. При выяснении вопросов чувствительности сложных мостовых схем намеренно нарушают равновесие и приходят к необходимости затраты большого труда и времени на решение групп уравнений, составляемых по несколько раз. Более простой и наглядный путь могут дать матричные преобразования, что можно показать на конкретных примерах.

При разработке специального прибора для одного устройства автоматического управления понадобилось найти комбинации сопротивлений схемы таким образом, чтобы получить некоторые заранее предписанные максимальные и минимальные значения тока в одной из цепей (R_c). Питание происходило от источника E некоторым током I , поддерживавшимся неизменным (рис. 1).

Нетрудно видеть, что эта схема совершенно идентична со схемой двойного измерительного моста Томсона, в котором сопротивление R_c заменено нуль-гальванометром; поэтому исследование вышеуказанного вопроса явилось одновременно анализом двойного моста в самом общем виде без допущения, что $i^c = 0$.

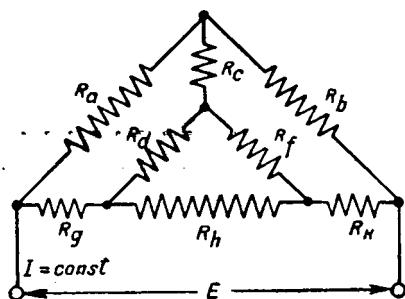


Рис. 1.

Литература

1. L. Cohen. Heavisides' Electrical Circuit Theory, New-York, 1928
2. А. М. Эфрос. А. М. Данилевский. Операционное исчисление и контурные интегралы. Харьков, 1937.
3. E. M. Mallett. Telegraphy and Telephony, London, 1929.
4. Л. Р. Карсон. Электрические и нестационарные явления и операционное исчисление, Киев — Харьков, 1934.
5. M. F. Gardner, J. Barnes. Transients on Linear Systems, New-York, 1942.
6. W. P. Mason. Electromechanical Transducers and Wave Filters, New-York, 1943.
7. L. A. Ware, H. R. Reed. Communication Circuits, New-York, 1944.

Обозначая переменные в отдельных ветвях до и после соединения через $i^a, i^b, i^c, i^d, i^f, i^g, i^k, i^h$ (рис. 2), а после соединения в контуры и подвода напряжения через $i^{a'}, i^{b'}, i^{c'}$ и $i^{q'}$, находим матрицу соединения C .

$$C = \begin{matrix} & \begin{matrix} a' & b' & c' & q' \end{matrix} \\ \begin{matrix} a \\ b \\ c \\ d \\ f \\ g \\ k \\ h \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & & & \\ & 1 & & \\ 1 & -1 & & \\ & & 1 & \\ 1 & -1 & 1 & \\ -1 & & & 1 \\ & -1 & & 1 \\ -1 & & -1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

Транспозиция дает:

$$C_t = \begin{matrix} & \begin{matrix} a & b & c & d & f & g & k & h \end{matrix} \\ \begin{matrix} a' \\ b' \\ c' \\ q' \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & & 1 & & 1 & -1 & & -1 \\ & 1 & -1 & & -1 & & -1 & \\ & & & 1 & 1 & & & -1 \\ & & & & & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2)$$

¹ Этот термин (см. статью Э. А. Мееровича [Л. 1]) мы предпочитаем термину Крона „тензор трансформации“. В остальном принимаем обозначения и, прямую нотацию* Крона [Л. 2].

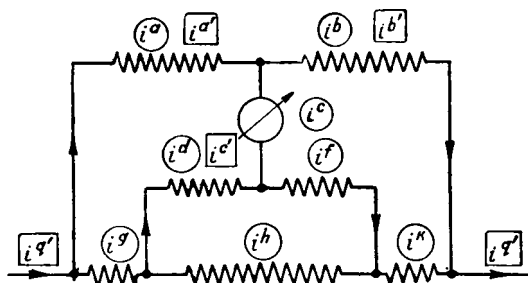


Рис. 2.

Так как диагональная матрица сопротивлений:

$$R = \begin{matrix} & \begin{matrix} a & b & c & d & f & g & k & h \end{matrix} \\ \begin{matrix} a \\ b \\ c \\ d \\ f \\ g \\ k \\ h \end{matrix} & \begin{bmatrix} R_a & & & & & & & \\ & R_b & & & & & & \\ & & R_c & & & & & \\ & & & R_d & & & & \\ & & & & R_f & & & \\ & & & & & R_g & & \\ & & & & & & R_k & \\ & & & & & & & R_h \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (3)$$

и $R' = C_t R C$, то

$$R' = \begin{matrix} & \begin{matrix} a' & b' & c' & q' \end{matrix} \\ \begin{matrix} a' \\ b' \\ c' \\ q' \end{matrix} & \begin{bmatrix} R_a + R_c + R_f + R_g + R_h & -R_c - R & R_f + R_h & -R_g - R_h \\ -R_c - R_f & R_b + R_c + R_f + R_k & -R_f & -R_k \\ R_f + R_h & -R_f & R_d + R_f + R_h & -R_h \\ -R_g - R_h & -R_k & -R_h & R_g + R_k + R_h \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (4)$$

Таков комплекс сопротивлений, оказываемых (после соединения) любым токам в контурах и току, подводимому к мосту.

Производим расщепление матрицы (4) согласно теории „ортогональных“ уравнений напряжения и тока².

$$\begin{matrix} & \begin{matrix} a' & b' & c' \end{matrix} \\ \begin{matrix} a' \\ b' \\ c' \end{matrix} & \begin{bmatrix} R_a + R_c + R_f + R_g + R_h & -R_c - R_f & R_f + R_h \\ -R_c - R_f & R_b + R_c + R_f + R_k & -R \\ R_f + R_h & -R & R_d + R + R_h \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (5)$$

$$\begin{matrix} & q' \\ \begin{matrix} a' \\ b' \\ c' \end{matrix} & \begin{bmatrix} -R_g - R_h \\ -R_k \\ -R_h \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (6)$$

$$r'_3 = \begin{matrix} a' & b' & c' \\ \begin{bmatrix} -R_g - R_h & -R_k & -R_h \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (7) \quad r'_4 = \begin{matrix} q' \\ \begin{bmatrix} R_g + R_k + R_h \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (8)$$

² См. (Л. 1), стр. 164—168, 172—173.

$$\begin{aligned}
 e'_1 &= \begin{bmatrix} a' & b' & c' \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & e'_2 &= q' \begin{bmatrix} q' \\ 0 \end{bmatrix} \\
 I'_1 &= \begin{bmatrix} a' & b' & c' \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & I'_2 &= q' \begin{bmatrix} q' \\ E' \end{bmatrix} \quad (\text{задан}) \\
 E'_1 &= \begin{bmatrix} a' & b' & c' \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & E'_2 &= q' \begin{bmatrix} q' \\ E_q' \end{bmatrix} \quad (\text{искомое напряжение})
 \end{aligned}$$

$$i'_1 = \begin{bmatrix} a' & b' & c' \\ i^{a'} & i^{b'} & i^{c'} \end{bmatrix}$$

(искомые токи в контурах)

Здесь согласно общей теории²: e'_1 —добавочные, т. е. независимые от E , э. д. с.; e'_2 —добавочные э. д. с. „вокруг открытых контуров“; $E'_2 = E_q'$ — напряжение, приложенное к узлам (в нашем случае единственное); I'_1 —токи, „наложенные“ в контурах (независимые от контурных токов I_1); I'_2 —токи, подведенные к узлам.

Допустим, что нам известны численные значения всех сопротивлений, что ток $i^{q'}$ также задан, и будем искать величины токов $i^{a'}$, $i^{b'}$ и $i^{c'}$, определяющие все токи в мосте. Ищем также E_q' .

В общем виде

$$i'_1 = r_1'^{-1}(e'_1 - r_2' I'_2) - I'_1, \quad (9)$$

$$E'_2 = r_3' i'_1 + r_4' I'_2 - e'_2, \quad (10)$$

а в рассматриваемом случае ($I'_1 = 0$, $e'_1 = 0$ и $e'_2 = 0$):

$$i'_1 = r_1'^{-1} - r_2' i^{q'}, \quad (11)$$

$$E'_2 = r_3' i'_1 + r_4' i^{q'}. \quad (12)$$

Находим $r_1'^{-1}$ из r_1' по обычным правилам матричного исчисления, т. е. транспозицией, заменой минорами с учетом знака (кофакторы) и делением на детерминант матрицы, (5).

Детерминант третьего порядка легко находится по правилу Сарруса.

В результате получим:

$$r_1'^{-1} = \begin{array}{c|c} & \begin{matrix} a' & b' \end{matrix} \\ \hline \begin{matrix} a' \\ b' \\ c' \end{matrix} & \begin{bmatrix} \frac{(R_b + R_c + R_f + R_k)(R_d + R_f + R_h) - R^2}{D} & \frac{-R_f(R_f + R_h) - (-R_c - R_f)(R_d + R_f + R_h)}{D} \\ \frac{(R_f + R_h)(-R_f) - (-R_c - R_f)(R_d + R_f + R_h)}{D} & \frac{(R_a + R_c + R_f + R_g + R_h)(R_d + R_f + R_h) - (R_f + R_h)}{D} \\ \frac{(-R_c - R_f)(-R_f) - (R_f + R_h)(R_b + R_c + R_f + R_k)}{D} & \frac{(R_f + R_h)(-R_c - R_f) - (R_a + R_c + R_f + R_g + R_h)(-R_f)}{D} \end{bmatrix} \end{array}$$

где

$$\begin{aligned}
 D = & (R_a + R_c + R_f + R_g + R_h)(R_b + R_c + R_f + R_k)(R_d + R_f + R_h) + \\
 & + (-R_c - R_f)(-R_f)(R_f + R_h) + (R_f + R_h)(-R_c - R_f)(-R_f) - \\
 & - (R_f + R_h)(R_b + R_c + R_f + R_k)(R_f + R_h) - \\
 & - (-R_f)(-R_f)(R_a + R_c + R_f + R_g + R_h) - \\
 & - (R_d + R_f + R_h)(-R_c - R_f)(-R_c - R_f).
 \end{aligned}$$

Теперь мы имеем в совершенно общем виде все данные для нахождения всех токов и приложенного извне напряжения при любых значениях R_a , R_b , R_c , R_d , R_f , R_g , R_h и $i^{q'}$.

Мы не решаем и не нужно решать никаких уравнений или даже перемножать алгебраические члены, находящиеся в скобках матрицы (13); мы можем сделать это после подстановки чисел, а затем найти результаты при помощи уравнений (11) и (12).

Пусть, например, требуется найти токи и приложенное извне напряжение при равенстве всех сопротивлений моста, т. е. $R_a = R_b = R_c = R_d = R_f = R_g = R_h = 1 \Omega$ и при токе $i^{q'} = 35 \text{ mA}$.

Подстановка в матрицу (13) дает:

$$r_1'^{-1} = \begin{array}{c|c} & \begin{matrix} a' & b' & c' \end{matrix} \\ \hline \begin{matrix} a' \\ b' \\ c' \end{matrix} & \begin{bmatrix} \frac{11}{35} & \frac{4}{35} & -\frac{6}{35} \\ \frac{4}{35} & \frac{11}{35} & \frac{1}{35} \\ -\frac{6}{35} & \frac{1}{35} & \frac{16}{35} \end{bmatrix} \end{array}$$

² Здесь и дальше числовые значения R и $i^{q'}$ взяты в несколько раз меньше, чем в действительном расчете.

$$\begin{aligned}
 \text{затем: } i'_1 &= \begin{array}{c|c} & \begin{matrix} a' & b' & c' \end{matrix} \\ \hline \begin{matrix} a' \\ b' \\ c' \end{matrix} & \begin{bmatrix} \frac{11}{35} & \frac{4}{35} & -\frac{6}{35} \\ \frac{4}{35} & \frac{11}{35} & \frac{1}{35} \\ -\frac{6}{35} & \frac{1}{35} & \frac{16}{35} \end{bmatrix} \end{array} \\
 & \times \begin{array}{c} \begin{matrix} a' \\ b' \\ c' \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} -2.35 \\ -1.35 \\ -1.35 \end{bmatrix} \end{array} = \begin{array}{c|c} & \begin{matrix} a' & b' & c' \end{matrix} \\ \hline \begin{matrix} a' \\ b' \\ c' \end{matrix} & \begin{bmatrix} 20 \text{ mA} \\ 20 \text{ mA} \\ 5 \text{ mA} \end{bmatrix} \end{array}
 \end{aligned}$$

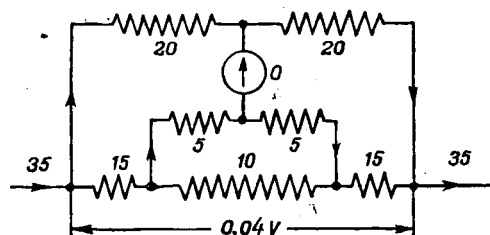


Рис. 3.

Получается уравновешенный мост (как и следовало ожидать при равенстве всех R) с данными согласно схеме рис. 3. Достаточно знать $i_{q'}$, $i_{a'}$, $i_{b'}$ и $i_{c'}$, чтобы определить токи во всех элементах моста.

$$E_q = q' \begin{bmatrix} a' & b' & c' \\ -2 & -1 & -1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a' & b' & c' \\ 0,020 & 0,020 & 0,005 \end{bmatrix} +$$

$$+ \begin{bmatrix} q' \\ 3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} q' \\ 0,035 \end{bmatrix} = 0,04 \text{ V},$$

$$\begin{array}{c} c' \\ \hline (-R_c - R_f)(-R_f) - (R_b + R_c + R_f + R_h)(R_f + R_h) \\ \hline D \\ \hline (-R_f)(R_f + R_h) - R_a + R_c + R_f + R_g + R_h)(-R_f) \\ \hline D \\ \hline R_c + R_f + R_g + R_h)(R_b + R_c + R_f + R_h) - (-R_c - R_f)^2 \\ \hline D \end{array} \quad (13)$$

Правильность этого результата легко проверить. Нарушим теперь равновесие моста, увеличив сопротивление R_a в два раза, т. е. $R_a = 2\Omega$.

Подстановка дает:

$$r_1'^{-1} = \begin{array}{c} a' & b' & c' \\ \hline a' & \frac{11}{46} & \frac{4}{46} & -\frac{6}{46} \\ \hline b' & \frac{4}{46} & \frac{14}{46} & \frac{2}{46} \\ \hline c' & -\frac{6}{46} & \frac{2}{46} & \frac{20}{46} \end{array}$$

Умножив на $-r_2' i_{q'}$, найдем распределение токов в схеме рис. 4:

$$i = \begin{bmatrix} a' & b' & c' \\ -2 & -1 & -1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a' & b' & c' \\ 0,0 & 0,01828 & 0,00761 \end{bmatrix} +$$

$$+ \begin{bmatrix} q' \\ 3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} q' \\ 0,035 \end{bmatrix} \approx 0,0487 \text{ V},$$

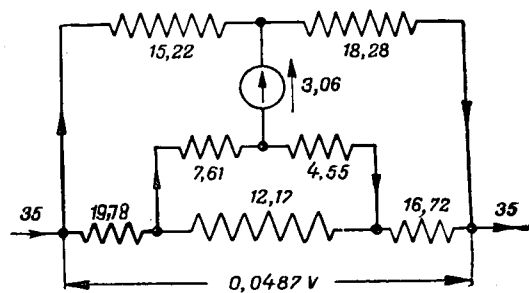


Рис. 4.

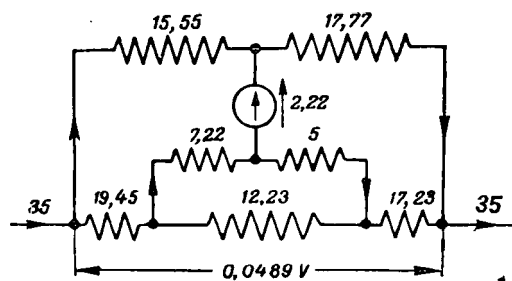


Рис. 5.

Изменим теперь сопротивление гальванометра в два раза, т. е. $R_c = 2\Omega$ и $R_a = 2\Omega$, а остальные сопротивления оставим прежними:

$$r_1'^{-1} = \begin{array}{c} a' & b' & c' \\ \hline a' & \frac{14}{63} & \frac{7}{63} & -\frac{7}{63} \\ \hline b' & \frac{7}{63} & \frac{17}{63} & \frac{1}{63} \\ \hline c' & -\frac{7}{63} & \frac{1}{63} & \frac{26}{63} \end{array}$$

Умножим, как раньше, на $-r_2' i_{q'}$ и найдем новое распределение токов в схеме рис. 5:

$$E_q = \begin{bmatrix} a' & b' & c' \\ 2 & -1 & -1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a' & b' & c' \\ 0,01555 & 0,01777 & 0,00722 \end{bmatrix} +$$

$$+ \begin{bmatrix} a' \\ 3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} q' \\ 0,035 \end{bmatrix} \approx 0,0489 \text{ V}.$$

Пусть, наконец, не $R_a = 2 \Omega$ при $R_c = 2 \Omega$, а $R_k = 2 \Omega$ при $R_c = 2 \Omega$, т. е. мост разбалансирован в другом контуре. Найдем:

$$r'_1 = \begin{array}{c|cc} & a' & b' & c' \\ \hline a' & \frac{17}{63} & \frac{7}{63} & -\frac{9}{63} \\ b' & \frac{7}{63} & \frac{14}{63} & 0 \\ c' & -\frac{9}{63} & 0 & \frac{27}{63} \end{array}$$

$$i'_1 = \begin{array}{c|cc} & a' & b' & c' \\ \hline a' & \frac{17}{63} & \frac{7}{63} & -\frac{9}{63} \\ b' & \frac{7}{63} & \frac{14}{63} & 0 \\ c' & -\frac{9}{63} & 0 & \frac{27}{63} \end{array} \times \begin{array}{c} \rightarrow \\ b' \\ \downarrow \end{array} = \begin{array}{c|cc} & a' & b' & c' \\ \hline a' & -2,35 & & \\ b' & -2,35 & & \\ c' & -1,35 & & \end{array} = \begin{array}{c|cc} & a' & b' & c' \\ \hline a' & 21,66 & 23,33 & 5 \end{array}$$

$$E_q = \begin{array}{c|cc} & a' & b' & c' \\ \hline a' & -2 & -2 & -1 \\ b' & & & \\ c' & & & \end{array} \times \begin{array}{c|cc} & a' & b' & c' \\ \hline a' & 0,0266 & 0,0233 & 0,005 \\ b' & & & \\ c' & & & \end{array} + \begin{array}{c} q' \\ 4 \end{array} \times \begin{array}{c} q' \\ 0,035 \end{array} \cong 0,045 \text{ V.}$$

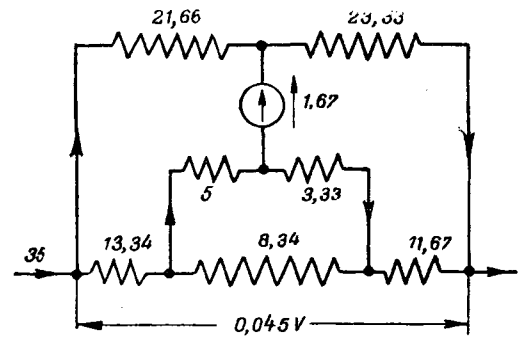


Рис. 6.

Распределение токов показано в схеме рис. 6.

Дальнейшее исследование приводит к интересным заключениям относительно характера изменения чувствительности моста.

Ограничимся этим замечанием, чтобы не выходить за рамки сообщения, целью которого было показать, как матричные методы расчета и исследования могут быть успешно применены и в электроизмерительной технике. Экономия труда и времени очевидна.

Следует также отметить, что мы коснулись анализа мостовых схем весьма кратко, ограни-

чившись рассмотрением простейших цепей, не связанных индуктивными и емкостными связями. Для них польза применения матричных преобразований еще более явна.

Литература

1. Э. А. Меерович. Геометрическая теория электрических цепей. Электричество, № 2, 1947.
2. G. Kron. The Application of Tensors to the Analysis of Rotating Electrical Machinery. GER, 1942, (Second and enlarged Edition).



К статье П. Н. Горшкова „Пути усовершенствования установочных проводов сильного тока“

(стр. 26 настоящего номера)

Проф. В. А. ПРИВЕЗЕНЦЕВ

Научно-исследовательский институт кабельной промышленности

П. Н. Горшков рекомендует немедленно приступить на ряде заводов к выпуску установочных проводов с полихлорвиниловой изоляцией (в первую очередь осветительных проводов марки ПВД), не учитывая ряда весьма существенных моментов. Полихлорвиниловый пластикат имеет недостатки, которые пока мешают широкому внедрению полихлорвиниловой изоляции. Научно-исследовательским институтом кабельной промышленности (НИИКП) Министерства электропромышленности было проведено сравнительное исследование поведения при коротких замыканиях стандартных проводов марки ПРД и скрученных в одной хлорвиниловой изоляции без оплетки. Испытания показали большие преимущества стандартных проводов с резиновой изоляцией. В ряде опытов при коротком замыкании, за счет выделившейся части горючих пластификаторов, провода с хлорвиниловой изоляцией астихивали на значительной длине, в то время как провода с резиновой изоляцией в оплетке не дали ни одного загорания даже в том случае, когда они вместе с резиновой изоляцией накаливались докрасна.

Проводимые нами работы по внедрению полихлорвиниловой изоляции в производство проводов встречают затруднения из-за низкого качества полихлорвинилового пластиката (низкое удельное объемное сопротивление изоляции, недостаточные морозостойкость и светостойкость, плохие механические характеристики). Основное здесь — создание рецептуры, а главное освоение в нужных размерах производства качественного пластиката, который к тому же и по стоимости должен быть более или менее конкурентоспособен с другими видами изоляции. В этом случае внедрение полихлорвинила в кабельной промышленности пойдет очень быстро и успешно.

Нужно восстановить производство проводов ТПРФ с оболочкой из мягкой стали. В производственных зданиях, складских помещениях, школах и т. п. такие провода обладают существенными преимуществами. Кроме того, они дешевле проводов с оболочкой из легких металлов или полихлорвинила, а восстановить производство их легче, чем организовывать заново производство трубчатых проводов с другими видами оболочек. Указанное отнюдь не исключает выпуска для монтажа в жилых и общественных помещениях проводов в алюминиевых, цинковых и т. п. оболочках, производство которых можно постепенно организовать на одном из наших кабельных заводов.

Нужно также срочно восстановить производство бергановских трубок как в стальной оболочке, так и в оболочках из легких металлов, а также организовать выпуск арматуры и приспособлений для монтажа этих изделий.

Работа в области улучшения защитных покровов должна вестись самым интенсивным образом. Прежде всего, необходимо повысить антисептические свойства наших пропитывающих составов, так как произведенная в НИИКП проверка существующих пропитывающих составов показала их низкую консервирующую способность. Большой интерес представляет нафтенат меди, добавление которого в количестве около 10% сильно повышает антисептические свойства пропитывающих составов. Этот антисептик интересен и в том отношении, что он недорог, а исходное сырье (медный купорос) можно получать в результате переработки отходов с кабельных заводов.

Из изложенного следует, что основное условие в деле повышения качества установочных проводов заключается не только в совместной работе кабельной промышленности и эксплуатирующих организаций, как это указано в статье П. Н. Горшкова, но в первую очередь в проведении ряда решительных мер в обеспечении кабельных заводов необходимыми материалами для изготовления качественных резиновых смесей.

Канд. техн. наук И. А. СЫРОМЯТНИКОВ

Технический отдел Министерства электростанций СССР

В течение последних лет технический отдел Министерства электростанций неоднократно ставил перед Министерством электропромышленности и Всесоюзным комитетом стандартов вопрос о низком качестве проводов марки ПР-380, о необходимости прекращения их производства и исключения из действующего стандарта. Одновременно ставился вопрос об увеличении выпуска проводов марок ПР-500, ПРТО-1000 и ТПРФ, а также о выпуске новых специальных проводов, устойчивых к воздействию паров, газов, кислот и т. п. Положение с проводами марки ПР-380 усугубляется тем, что из электростанций и электроустановках промышленных предприятий получила применение прокладка проводов в стальных трубах. Ввиду ограниченного выпуска кабельными заводами специальных проводов для прокладки в трубах марки ПРТО-1000 и марки ПР-500, допущенных временно для прокладки в трубах взамен ПРТО-1000, потребители были вынуждены применять провода марки ПР-380.

Обследованием электроустановок ряда заводов, произведенным Главэлектромонтажем в 1944 г., было установлено, что средний срок службы проложенных в трубах проводов марки ПР-380 составляет не более 2—3 мес., в то время как средний срок службы проводов марок ПР-500 и ПРТО-1000 в тех же условиях — от 4 до 5 лет. В химических производствах даже провода марок ПРТО-1000 и ПР-500, проложенные в стальных трубах, работают не более одного года.

В соответствии с изложенным Министерство электростанций и Главэлектромонтаж приняли совместное решение о запрещении применения проводов марки ПР-380 для прокладки в трубах. Вполне понятно, что потребители испытывают в связи с этим и отсутствием необходимых проводов значительные трудности. Необходимо, чтобы Министерство электропромышленности прекратило выпуск проводов марки ПР-380 и улучшило качество других изолированных проводов в соответствии со статьей П. Н. Горшкова.

Большая потребность ощущается в выпуске новых типов проводов, которые можно было бы применять для скрытой проводки под штукатуркой без дополнительной защиты их эбонитовыми трубками, в сырых помещениях и в условиях, где провода подвергаются воздействию паров, кислот, масел и т. п.

Полихлорвиниловые провода, при условии улучшения их качества, найдут у нас широкое распространение. Однако, требуется проведение значительной работы по изучению их в лабораторных условиях и в условиях эксплуатации и по улучшению их качества.

Министерству электропромышленности следует рекомендовать, чтобы выбор тех или иных новых марок проводов для массового производства, как это указывает в своей статье П. Н. Горшков, производился лишь после тщательного изучения проводов в лабораторных условиях и в условиях эксплуатации и после широкого обсуждения вопроса совместно с эксплуатирующими и монтажными организациями.

Доктор техн. наук, проф. С. М. БРАГИН

Московский энергетический институт им. Молотова

Высказанные в статье П. Н. Горшкова предложения не совсем приемлемы в том виде, как они сформулированы. Например, нельзя согласиться с тем, чтобы провода ПР-380 совсем были сняты с производства и оставлены только провода ПР-500. Это повело бы к сокращению количества выпускаемых проводов и значительному перерасходу электроизоляционных материалов. Провода ПР-380, как и ПРД, нужно продолжать выпускать, приняв меры к некоторому повышению качества за счет применения более лучших резины и пропитывающих составов, а также введя обязательное испытание проводов на заводе. Эти провода должны быть использованы только по своему назначению, т. е. для прокладки по роликам. Для того, чтобы из-за недостатка проводов соответствующих марок не применяли проводов ПР-380, нужно прежде всего сильно увеличить выпуск проводов марок ПР-500 и ПРТО. Кроме того, безусловно нужно изменить требования к проводам ПР-380 в отношении качества изоляционной резины и улучшения пропитки оплетки проводов.

Совершенно правильно поставлен вопрос о введении в производство влагостойкой резины для изоляции проводов, которые могут подвергаться действию влаги и воды, например проводов марки ПРТО.

Должна быть проделана большая научно-исследовательская работа по выбору наиболее подходящего к нашим сырьевым условиям состава влагостойкой резины и по установлению оптимальных качественных показателей влагостойких резиновых смесей. Большим и весьма важным вопросом является выбор наиболее рациональных методов испытания резиновых смесей на влагостойкость.

Вполне правильно предложение П. Н. Горшкова относительно сокращения выпуска кабелей СРГ за счет возобновления производства проводов ТПРФ в оболочке из мягкой стали или цинка и замены свинцовой оболочки цингом из резиновых или полихлорвинилового пластика.

Особенное внимание Министерства химической промышленности следует обратить на крайне низкое качество полихлорвинилового пластика, выпускаемого заводами. За время, прошедшее с начала работ в СССР по освоению полихлорвинила в кабельной промышленности, никаких значительных изменений в качестве пластика и никаких шагов по получению новых термопластических материалов и кополимеров химической промышленностью

не сделано. Создавшееся совершенно недопустимое положение с отсутствием пластика приемлемого качества в какой-либо работы по созданию новых термопластических материалов тормозит развитие кабельной промышленности и наносит большой ущерб народному хозяйству. Та обстоит дело не только с одним полихлорвиниловым пластиком, но и с другими не менее важными материалами. Нужно положить конец такому отношению министерств—поставщиков к материалам для кабельной промышленности.

Инж. С. С. КАЛУГИН

Завод «Севкабель»

Еще в 1940 г. Главкабель создал специальную комиссию с целью определить необходимые условия для улучшения кабельной продукции. Несмотря на то, что с момента окончания работы комиссии прошло 8 лет, основные моменты, выработанные комиссией и теперь вновь поднятые в статье П. Н. Горшкова, не перестали быть актуальными, так как за эти годы реализовано крайне мало из выводов комиссии.

Развитие промышленности пластических масс дает возможность сейчас значительно увеличить число типов изоляции, применяемой в установочных проводах, и расширить ассортимент выпускаемых проводов. Кабельная промышленность СССР еще перед войной провела значительные работы в части внедрения в производство полихлорвинила в качестве как электроизоляционного материала, так и заменителя свинца. Опыт, полученный в СССР за время войны, и зарубежные данные показывают возможность широкого внедрения в производство не только полихлорвинила, но и целого ряда других пластиков, могущих значительно улучшить качество установочных проводов.

Для характеристики изоляции из отечественного полихлорвинила можно привести пример кабеля, изготовленного заводом «Севкабель» в начале 1940 г. Указанный кабель, выпущенный заводом в качестве опытного, работал надежно.

Значительное улучшение качества проводов с резиневой изоляцией может быть достигнуто повышением качества синтетического каучука и наполнителей.

Вполне поддерживая выдвинутые П. Н. Горшковым положения об улучшении качества установочных проводов, мы считаем несколько преждевременным отказываться от выпуска установочных проводов на 380 В под тем предлогом, что изоляция их не относится к высшему классу. Область применения этих проводов, в связи с резко увеличивающимся расходом их для электрификации сельского хозяйства, определилась достаточно четко; удорожать эти провода вряд ли нужно. Также несколько преждевременно снимать с производства провода ОРГ, так как промышленность пока еще не может дать для этих проводов эквивалентную замену.

Инж. Т. М. ОРЛОВИЧ

Завод Министерства электропромышленности СССР

Правильно заостряя вопрос об усовершенствовании конструкций установочных проводов сильного тока, П. Н. Горшков в то же время в некоторых положениях базируется на неверных с нашей точки зрения основаниях вследствие чего приходится иногда к не совсем правильным выводам. В первую очередь это относится к требованиям исключения из ГОСТ В-1977-43 провода марки ПР-380. Автор статьи не учитывает разницу в условиях прокладки проводов на 380 и 500 В и, делая правильное заявление о недопустимости скрытой прокладки проводов ПР-380, ошибочно требует прекращения их выпуска. Провода марки ПР-380 согласно стандарту предназначаются для открытой прокладки на роликах и изоляторах. Такие сети в Советском Союзе имеют огромную протяженность. Применение в этих сетях проводов ПР-500 является ненужной роскошью.

В статье указано, что провода ПР-380 не подвергаются электрическим испытаниям и проходят только контрольную перематку. В действительности, по ГОСТ В-1977-43 провода марки ПР-380 должны проходить испытание на аппаратах сухого испытания при напряжении 1000 В, но так как аппараты сухого испытания имеют первую ступень напряжения 2000 В, то практически провода ПР-380 испытываются на 2000 В и мы считали бы правильным это внесенное жизнью ужесточение условий испытания зафиксировать в стандарте. Для изоляции проводов ПР-380 согласно действующему ГОСТ В-1977-43 должна применяться резина типа РИ-3 и РТИ-3. Из приведенной в статье сравнительной таблицы электрических характеристик резин по ГОСТ 2063-43 видно, что РИ-3 и РТИ-3 по своим электрическим качествам хуже резин РИ-2 и РТИ-2 так как удельное объемное сопротивление и $\tan \delta$ резин РИ-3 и РТИ-3 не нормируются, а пробивная прочность установлена не менее 10 кВ/мм. Фактически же применяемая нами резина для изоляции проводов ПР-380 и ПР-500 изготавливается по общей рецептуре, причем эта резина после 24 h пребывания в воде при комнатной температуре дает удельное объемное сопротивление $1 \cdot 10^{14} \Omega \text{ см}$, $\tan \delta$ 0,021 и пробивную прочность 30 кВ/мм. Таким образом, изоляция проводов ПР-380 и ПР-500 различается только по толщине.

Переход полностью на провода марки ПР-500 нецелесообразен и потому, что в сельских местностях и многих городских объектах скрытая проводка неприменима, а для открытой проводки на роликах и изоляторах провода ПР-380 вполне подходят при условии хорошего качества изоляции. Последнее может быть обеспечено соответствующим изменением действующего стандарта.

Проведенное П. Н. Горшковым сравнение толщин изоляции с нормами имеет целью доказать, что принятые у нас толщины изоляции низки. С этим положением также согласиться нельзя. Есть полная возможность выпускать провода на напряжение 500 В при толщинах изоляции, принятых для ПР-380. С нашей точки зрения такое изменение толщины поможет разрешить вопрос повышения нагрузок на провода, так как улучшится теплоотдача. Именно вопрос снижения толщины изоляции при условии улучшения ее качества должен явиться основным при усовершенствовании конструкций проводов.

Недостаточно правильно освещены П. Н. Горшковым работы наших кабельных заводов по повышению нагревостойкости резин; по статье получается, что у нас этот вопрос совершенно не проработан. В действительности наши кабельные заводы для целей изоляции с конца 1940 г. применяют только нагревостойкие (тиурамовые) резины и почти полностью отказались от сернистых резин. Однако, до настоящего времени не проведена тщательная проверка нагревостойкости наших резин и не установлены допустимые температуры. Также необходимо проверить наши резины с точки зрения влагостойкости. Эти исследовательские работы должны быть предусмотрены в тематических планах Института кабельной промышленности и ВЭИ.

Вопрос повышения точки размягчения пропиточных составов заслуживает внимания, но в этом вопросе нужно соблюдать крайнюю осторожность. Из опыта последних лет мы видим, что применение пропиточных составов с высокой температурой размягчения часто влечет за собой разрушение праж.

Правильно заострен в статье вопрос о необходимости более широкого использования в кабельной изоляции хлорвиниловых пластикаторов, однако необходимо добиться от Министерства химической промышленности резкого повышения качества пластиката.

Полностью можно согласиться со вторым разделом статьи «Установочные провода для непосредственной прокладки по стенам и под штукатуркой».

Инж. В. Н. КРАСОТКИН

Технический отдел Министерства электропромышленности СССР

Необходимость повышения качества выпускаемых кабельной промышленностью установочных проводов и освоения новых конструкций проводов очевидна. Первым

шагом в этом направлении должна быть замена проводов марки ПР-380 на ПР-500, так как переход на производство ПР-500 взамен ПР-380 требует дополнительных установок и производственных площадей, эта замена должна производиться постепенно. Переход на ПР-500 не снимает задачи повышения качества изоляции и, в частности, повышения нагревостойкости и влагостойкости резины и улучшения компаундов для защитных покрытий.

Вследствие влагостойкости, маслостойкости и химостойкости полихлорвинила, а также его высокой механической прочности, позволяющей не применять дополнительных защитных хлопчатобумажных оплеток, внедрение его в качестве изоляции установочных проводов крайне желательно. Для этого Министерство химической промышленности должно разработать и освоить новую рецептуру полихлорвинилового пластиката с большей стабильностью электрических характеристик при повышенных температурах.

Применение выпускаемого ныне пластиката вынудит понизить температуру нагрева проводов, т. е. понизить нагрузки, что приведет к необоснованному перерасходу меди.

Поэтому с утверждением автора о возможности в настоящее время начать внедрение полихлорвинила в качестве изоляции проводов марки ПРД малых сечений согласиться нельзя по той причине, что эти провода очень часто перегружаются довольно сильно.

Целесообразно установить на всех заводах, выпускающих кабели СРГ, хотя бы по одному (на первое время) шприц-прессу для ошлангования изолированных резиной жил полихлорвинилом, что ускорит внедрение и развитие производства проводов СРГ с полихлорвиниловой оболочкой.

Министерство химической промышленности должно также решить задачу повышения стойкости полихлорвинила против естественного старения и повышения его механической прочности.

Первоочередной же задачей химической промышленности является резкое увеличение выпуска полихлорвинилового пластиката, без чего внедрение его в какие-либо новые изделия как для изоляции, так и для защитных оболочек будет невозможно.

Инж. П. Ф. СОЛОВЬЕВ

Главэлектромонтаж

П. Н. Горшков в своей статье затрагивает весьма актуальный вопрос. Номенклатура установочных проводов сильного тока, выпускавшихся кабельной промышленностью до войны и выпускаемых в настоящее время, немногочисленна. Качество этих проводов в большинстве случаев не отвечает требованиям, предъявляемым условиями монтажа, и характером окружающей среды, в которой эксплуатируются провода.

Низкое качество и малый срок службы установочных проводов приводят к тому, что в ряде случаев эксплуатирующие организации отказываются от проводов этими проводами и заменяют их кабельными линиями. Выдвигаемые автором предложения о расширении номенклатуры установочных проводов сильного тока, выпускаемых нашей кабельной промышленностью, о резком улучшении качества и повышении нагревостойкости их изоляции встретят живой отклик среди электриков, проектирующих, монтирующих и эксплуатирующих электроустановки. В первую очередь, безусловно, необходимо повысить качество проводов марки ПР-500, совершенно прекратив производство проводов марки ПР-380. Одновременно с этим кабельные заводы должны резко увеличить выпуск проводов марки ПРТО, добиваясь улучшения их качества.

Предлагаемое П. Н. Горшковым постепенное сокращение выпуска проводов марки ПРД следует приветствовать, однако параллельно с этим необходимо расширить выпуск защищенных проводов марки ТПРФ и наладить производство аналогичных проводов в неметаллической защитной оболочке.

Автор прав, поднимая вопрос о нерациональности широкого выпуска кабелей марки СРГ. Еще до войны кабельная промышленность пыталась заменить частично

этот кабель другим — марки НРГ (с резиновой изоляцией в негорючей совпременной оболочке). В настоящее время у нашей кабельной промышленности имеются еще большие, чем перед войной, возможности для того, чтобы наладить выпуск проводов или кабелей без свинцовой оболочки для работы в особо влажной или химически активной среде.

Наши кабельные заводы имеют возможность быстро наладить выпуск трубчатых проводов с антикоррозийным покрытием; следует реализовать эту возможность.

Провода без покрытия с успехом могут применяться для проводов в условиях нормальной среды. Ссылки на отсутствие арматуры для монтажа трубчатых проводов являются несостоятельными. В большинстве крупных монтажных и эксплуатирующих организаций налажено производство арматуры для монтажа кабелей марки СРГ; эта же арматура может применяться и для монтажа намечаемых к выпуску проводов.

Конечно, выпуская трубчатые провода, кабельщики не должны прекращать подготовку производства проводов с иными видами защитных оболочек, в частности, проводов с нормальной и маслостойкой изоляцией в металлическом гибком шланге, типа ВХ. Эти провода найдут широкое применение для проводов по кранам, станкам, экскаваторам, в подъемно-транспортных устройствах и т. п.

Кабельной промышленности следует также наладить выпуск нагревостойких проводов для открытой прокладки и прокладки в трубах, допускающих нагрев свыше 70° С.

Кандидат техн. наук П. Н. ГОРШКОВ

Замечания по статье касаются в основном двух вопросов — снятия с производства проводов марки ПР-380 и порядка внедрения проводов с полихлорвиниловой изоляцией. Ввиду того, что замечания по этим вопросам оказались противоречивыми, необходимо указать следующее.

1. При принятых на заводах методах наложения резиновой изоляции и, в особенности, при наложении изоляции на горячих прессах и при использовании резин, содержащих 25—30% каучука, очень трудно обеспечить непрерывность и высокое качество слоя изоляции толщиной 0,6—0,8 мм по всей длине провода, причем эти трудности резко возрастают с увеличением сечения токоведущих жил. Испытание напряжением 2 000 В на искровых аппаратах, которое предлагает ввести Т. М. Орлович, способно выявить лишь самые грубые дефекты. Провода ПР-500 по ГОСТ В 1977-43 должны испытываться на искровых аппаратах напряжением не менее 6 000 В. Таким

образом, провода ПР-380, даже прошедшие полностью испытание напряжением в 2 000 В на искровых аппаратах, по степени своей надежности будут значительно ниже, чем провода ПР-500. Поэтому если и следует сохранить в какой-то мере выпуск проводов марки ПР-380, то только сечений не выше 4 мм², т. е. тех же сечений, которые применяются для проводов ПРД.

2. Рецептура полихлорвиниловой пластмассы, которая требуется для изолирования установочных проводов, должна быть, очевидно, совершенно иной, чем для полевых проводов. Поскольку провода типа ПР прокладываются внутри помещений, то к ним нет необходимости предъявлять очень высокие требования в отношении морозостойкости. Как известно, для повышения морозостойкости полихлорвиниловой пластмассы в нее вводят значительное количество пластификаторов, которые сильно повышают стоимость изоляции и довольно резко снижают степень ее негорючести. Поэтому испытания Института кабельной промышленности, на которые ссылается В. А. Привезенцев, не убедительны, и их следует повторить, применяя специально разработанную для установочных проводов полихлорвиниловую пластмассу. Для получения сравнимых результатов при проведении этих испытаний следует пользоваться новейшей методикой испытания на негорючесть.

3. К составам для пропитки оплеток установочных проводов нельзя механически предъявлять те же требования, что и для пропитки защитных проводов подземных кабелей и оплеток полевых проводов связи. Для подземных кабелей и отчасти для полевых проводов все мероприятия по повышению антисептических свойств пропиточных составов действительно очень существенны. Для установочных проводов сильного тока не менее важную роль играет требование о повышении нагревостойкости и атмосферостойкости пропитываемых составов. Между тем, как этому вопросу, так и всем остальным вопросам, связанным с улучшением качества установочных проводов, Институт кабельной промышленности уделяет пока недостаточное внимание. Поэтому еще рано говорить о достижениях названного института в этой области.

4. В статье не было указаний на то, что кабельная промышленность может легко наладить выпуск трубчатых проводов с антикоррозийным покрытием как об этом пишет П. Ф. Соловьев. Для организации производства этих проводов требуется установка малых бронировочных машин. В существующих условиях легче наладить массовый выпуск проводов с защитным покрытием из негорючей шланговой резины или из пластмассы.

Хочется высказать пожелание, чтобы технический совет Министерства электропромышленности разработал конкретный план мероприятий по улучшению качества установочных проводов сильного тока и расширению их ассортимента и взял бы под свой контроль его проведение.

ОТ РЕДАКЦИИ

Статья П. Н. Горшкова и дискуссия по ней определенно свидетельствуют об отставании, имеющемся в настоящее время в области производства установочных проводов сильного тока. Внедрение новой техники, особенно новой электроизоляционной техники, в производство установочных проводов является неотложной задачей большой важности. В статье и замечаниях участников дискуссии выдвинуты вопросы, требующие быстрого разрешения Министерством электропромышленности и Министерством химической промышленности.



К статье С. М. Сердинова «К проблеме энергоснабжения электрических железных дорог большой протяженности»¹

(ЭЛЕКТРИЧЕСТВО № 9, 1947)

Инж. Ф. П. ЛАШКОВ и инж. Я. И. ЛЕЙТЕС

Теплоэлектропроект

Выполненное Теплоэлектропроектом (ТЭП) проектирование схем электроснабжения тяговых подстанций ряда участков магистральных железных дорог, намеченных к электрификации в ближайшие 5—10 лет, приводит к вполне определенным решениям. В отдельных случаях схемы, конечно, могут быть иными, но большая повторяемость решений по основным вопросам позволяет рассматривать их как принципиальное решение для электроснабжения магистральных железных дорог.

Намеченные схемы в некоторых отношениях являются своеобразными и применяемые в них принципы существенно отличаются от решений, принимаемых при проектировании районных и промышленных сетей.

Необходимо остановиться на нескольких вопросах, поскольку статья С. М. Сердинова, в которой используются работы ТЭП, недостаточно освещает некоторые основные положения.

Для одной из электрифицируемых железных дорог длиной около 625 км, проходящей по сельскохозяйственным районам, не имеющим ни развитой промышленности, ни местного топлива, ни сооружаемых гидроэлектростанций, ТЭП при разработке общей схемы электроснабжения намечает осуществить питание тяговых подстанций от конечных пунктов, являющихся промышленными центрами со сравнительно развитыми энергосистемами, и от вновь сооружаемой промежуточной тепловой электростанции. Между конечными пунктами намечается прокладка двухцепной линии передачи 110 кВ, которая сооружается на металлических опорах и к которой должны присоединяться тяговые подстанции железной дороги.

Районные нагрузки были определены на основе подсчетов потребности в электроэнергии потребителей, расположенных на расстоянии около 20—25 км по обе стороны от трассы электрифицируемой железной дороги.

Электроснабжение пунктов, удаленных от железной дороги на расстояние 50 км и более, связано со значительным увеличением затрат на питательные магистрали от подстанции электрифицированной железной дороги, что существенно увеличит и без того значительные издержки по сооружению распределительных сетей. Подобное решение является нереальным на ближайший период времени.

Фактически, однако, имеется некоторая возможность увеличения нагрузки за счет резервов в пропускной способности передачи. Расчеты показали, что при наибольших нагрузках электротяги потеря напряжения до точек токораздела при пропорциональном питании тяговых подстанций от электростанций (нормальный режим) составит всего около 4%.

При питании участков между электростанциями с одной стороны и некотором изменении потоков реактивной мощности, передаваемых от них в сеть, потеря напряжения увеличится незначительно и составит около 6%.

Произведенный анализ показал, что за счет запасов, имеющихся в линиях передачи и в располагаемой величине потери напряжения, возможно увеличение нагрузок районных потребителей примерно вдвое.

Таким образом, в рекомендованной ТЭП схеме районная нагрузка учтена в достаточной степени и имеются возможности ее увеличения примерно вдвое без добавочных вложений в основную сеть. С некоторыми дополнительными затратами, связанными, главным образом, с мероприятиями по регулированию напряжения, районная нагрузка может быть еще увеличена.

В качестве источников питания были приняты электростанции в промышленных районах по концам рассматриваемого участка электрифицируемой железной дороги и промежуточная электростанция. Промежуточная электростанция при принятых расчетных нагрузках должна иметь мощность 50—75 тыс. кВт. Такое решение в рассматриваемых условиях является наиболее целесообразным, так как укрупнение станций по концам участка за счет отказа от промежуточной станции существенных экономических выгод дать не могло. В то же время при принятых максимальных расчетных нагрузках существенно утяжелялась высоковольтная сеть, и надежность электроснабжения, безусловно, понижалась. Условия топливоснабжения не могли оказать существенного влияния, так как топливо как для промежуточной станции, так и для станций по концам участка не местное, а привозное, и сооружение промежуточной станции вызвало только некоторый дополнительный транспорт топлива (без перегрузки) по электрифицированной железной дороге.

В ряде схем помимо рассматриваемого участка повторялись те же условия, что позволяет считать данную схему в отношении источников питания при повторении таких энергетических условий типовой.

Если бы электрификация осуществлялась на базе энергии гидроэлектростанций или тепловых электростанций на местном топливе, решение, безусловно, могло бы быть и иным, однако с изменениями в высоковольтной сети, которые должны существенно увеличить затраты на эту часть сооружений, так как в этом случае потребовалось бы или увеличить напряжение для распределительной сети, или создать кроме распределительной сети (с напряжением 110 кВ) сеть повышенного напряжения для питания этой распределительной сети.

Коммутация тяговых подстанций. Для электрифицируемых железных дорог применяется в настоящее время постоянный ток напряжением 3 000 В. Преобразование переменного тока в постоянный осуществляется посредством ртутных выпрямителей со специальными понижающими трансформаторами, которые могут быть выполнены с первичным напряжением 6, 10, 35 и 110 кВ. На каждой тяговой подстанции предусматривается установка 3—4 агрегатов с трансформатором типа ТМР-3 200 кВА. Использование напряжения 6, 10 и 35 кВ для питания тяговых подстанций будет целесообразно лишь на отдельных участках, расположенных на близком расстоянии (5—25 км) от существующих энергосистем с развитыми сетями 6, 10 и 35 кВ.

При применении напряжения 110 кВ, а также 154 кВ для питания тяговых подстанций следует как типовое решение принять схему с двойной трансформацией с установкой на каждой тяговой подстанции одного трансформатора 110 или 154 кВ, что в значительной мере уменьшит потребное количество дефицитного оборудования 110 и 154 кВ (трансформаторов и выключателей).

При аварийном выходе на тяговую подстанцию единственного трансформатора нагрузка ее кратковременно должна быть воспринята двумя соседними подстанциями по контактной сети постоянного тока, что должно учитываться при выборе мощности трансформаторов и проектировании тяговой сети. Для замены выбывшего трансформатора необходимо иметь на каждые 100—125 км пути (4—5 тяговых подстанций) передвижной резервный агрегат, устанавливаемый на железнодорожной платформе.

В условиях электрификации магистральных железнодорожных линий с большим количеством тяговых подстанций применение передвижных резервных трансформаторов в некоторых случаях и целых передвижных подстанций является весьма эффективным, так как в значительной мере упрощает схему и конструкцию подстанций, эконо-

¹ Окончание дискуссии; начало—№ 1, 1948.

мит денежные средства и дефицитное оборудование и должно быть распространено на все проектируемые объекты.

По принятой упрощенной схеме присоединения тяговых подстанций отпайками через разъединители к питающим линиям 110—154 кВ при наличии одного выключателя перед трансформатором — предполагается, что нормально тяговая подстанция питается от одной из цепей, а второй разъединитель разомкнут.

Для обеспечения надежного электроснабжения тяговых подстанций при выходе одной из цепей следует предусмотреть устройство АПВ на питающих линиях, а также автоматизацию процессов включения и выключения линейных разъединителей, что позволит быстро переключить питание тяговых подстанций на вторую питающую линию 110—154 кВ. Вторичное напряжение на трансформаторах тяговых подстанций следует принять 10 кВ, а не 6 кВ, как обеспечивающее больший радиус охвата питания района. В тех случаях, когда для питания местного района оказывается целесообразным применение напряжения 35 кВ, следует предусмотреть установку трехобмоточных трансформаторов 110—154/38,5/11 кВ.

При выборе единичной мощности трансформаторов следует учесть характер графика тяговой нагрузки и, возможные пики: часовые, полчасовые и 15-минутные. С другой стороны, следует также принять во внимание возможную кратковременную перегрузку трансформаторов.

Напряжение и схема электропередачи. Выбор напряжения тесно связан со схемой передачи и размещением источников питания. Расчеты показали, что при применении напряжения 110 и 154 кВ источники питания должны быть размещены через каждые 400—500 км, при этом будут обеспечены удовлетворительные уровни напряжения на подстанциях при аварийных режимах в сети и на электростанциях.

Теплоэлектропроект произвел техно-экономическое сравнение ряда вариантов для решения вопроса выбора наиболее целесообразного напряжения передачи. При наличии промежуточной тепловой электростанции, расположенной примерно в середине участка, были подвергнуты рассмотрению следующие варианты.

Вариант I, по которому питание тяговых подстанций осуществляется при одном напряжении 110 кВ, для чего на всем протяжении сооружается двухцепная линия передачи на металлических опорах. Вдоль трассы через каждые 100—125 км (3—4 тяговых подстанции) сооружаются опорные подстанции 110 кВ, куда заводятся через выключатели все питающие линии. На этих опорных подстанциях намечается установка передвижных резервных трансформаторов.

Вариант II, по которому для питания тяговых подстанций применяется два напряжения: 110 и 35 кВ. Сеть 110 кВ является питательной, а сеть 35 кВ — распределительной. Для распределения электроэнергии при напряжении 35 кВ сооружаются 4 опорные подстанции, на которых устанавливаются трехобмоточные трансформаторы 110/38,5/11 кВ. По этому варианту специальные тяговые трансформаторы приняты напряжением 35 кВ. Питательная сеть 110 кВ принята двухцепной на $\frac{2}{3}$ длины всего участка и одноцепной на остальные части. Линии передачи 35 кВ сооружаются на деревянных опорах.

Вариант III, по которому питание тяговых подстанций осуществляется при одном напряжении 154 кВ, с прокладкой двух цепей на головных участках и одной цепи на остальной части. На всех тяговых подстанциях устанавливается по одному трансформатору 154 кВ и предусматривается передвижной резерв.

Вариант IV, по которому для питания тяговых подстанций применяются два напряжения 154 и 35 кВ. Схема построения сети в основном аналогична варианту II.

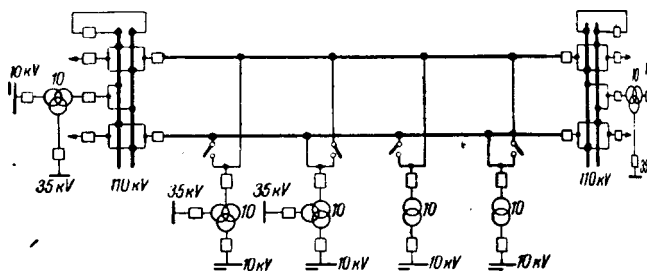
Основные показатели сравнения вариантов приводятся в таблице.

Произведенные расчеты позволяют сделать вывод, что при электрификации железных дорог большой протяженности наиболее целесообразно применение одного напряжения 110 кВ с присоединением тяговых подстанций по упрощенным схемам к питающим линиям (см. рисунок).

В условиях рассмотренного примера передачи напряжения 110 кВ, помимо обеспечения приемлемых уровней

Показатели экономического сравнения вариантов напряжения электропередачи

Наименование элементов	Варианты			
	I	II	III	IV
Ориентировочные капитальные затраты, млн. руб	101,2	120,4	113,3	124,3
В том числе:				
а) на линии передачи	62,5	80,8	59,6	80,7
б) на подстанции	38,7	39,6	53,7	43,6
Годовые потери энергии, млн., kWh	14,5	32,9	6,35	29,2
Затраты на сталеалюминевых проводов, т	1 560	2 642	1 662	2 460
Суммарное количество и мощность трансформаторов 110—154 кВ (с учетом передвижного резерва), $\frac{\text{шт.}}{\text{тыс. кВА}}$	30 300	8 206	30 300	8 206
Потребное количество выключателей 110—154 кВ	46	24	53	22
Суммарные сравнительные годовые расходы (отчисления от затрат + стоимость годовых потерь), млн. руб	17,65	23,6	18,7	23,9



напряжений при нормальных и аварийных режимах, позволяет осуществлять обмен мощностями между системами в размере порядка 20—25 тыс. кВт за счет перераспределения питания тяговых подстанций.

Напряжение 154 кВ в аналогичных условиях позволяет передать несколько большую мощность, а именно 35—40 тыс. кВт, что, однако, существенного значения не будет иметь и, учитывая значительно большие капитальные затраты и большую дефицитность оборудования 154 кВ, следует считать, что применение этого напряжения при электрификации железных дорог будет весьма ограниченным.

Схемы передачи с применением двух напряжений 110 и 35 кВ или 154 и 35 кВ, безусловно, являются нежелательными при электрификации длинных железнодорожных линий, так как обуславливают большие затраты и потери энергии.

Схема сети и присоединения тяговых подстанций, принятая ТЭП, является исключительно простой и в то же время может обеспечить надежное питание при осуществлении современных новейших схем защиты и применении недостаточно используемых в нашей практике передвижных трансформаторов, которые в данном случае подходят больше, чем где-либо.

Преимуществом схемы является и ее гибкость в отношении возможности удовлетворения роста потребности в электроэнергии вдоль железных дорог либо за счет развития существующих и вновь сооружаемых станций, либо за счет подвода энергии извне от будущих гидроэлектростанций (а возможно и иных удаленных источников электрической энергии путем создания опорных подстанций более высокого напряжения, или постоянного тока без существенного изменения распределительной сети, так как она сама по себе является достаточно мощной). Некоторым недостатком схемы является затруднительность обмена мощности между конечными системами, так

как все маневрирование в их мощности заключается в большем или меньшем питании промежуточной нагрузки с той или другой стороны. Все же эта мощность составляет величину порядка 25 тыс. kW и при современном развитии этих систем является величиной достаточно крупной и хорошо увязывается с мощностью агрегатов.

В связи с большими расстояниями передачи были произведены ориентировочные расчеты для оценки устойчивости передачи, которые показали наличие достаточных запасов при такой передаче.

Ограниченность маневрирования повлечет за собой необходимость соответствующей координации в развитии систем, что достаточно удовлетворительно может быть решено и не противоречит единичной мощности применяемых агрегатов.

Ряд частных вопросов, не могущих повлиять на решение основных вопросов, требует дальнейшей разработки. К ним относятся, например: 1) работа тепловых электростанций на нагрузку с преобладанием в ней тяговой составляющей, имеющей значительные пики нагрузки, что, очевидно, может повлиять на некоторые решения по тепловой части станции и регулированию процессов их работы; 2) связь энергосистем, расположенных на значительном расстоянии через распределительные линии тяговых подстанций. Параллельная работа таких систем может быть затруднена в связи с большими расстояниями, относительно низкими напряжениями линий связи и толчками нагрузками от тяги. Представляется, что при надлежащем регулировании напряжения, частоты и мощности, передаваемой по линиям, удовлетворительная работа может быть налажена.

Доктор техн. наук, проф. П. С. ЖДАНОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

В задаче электроснабжения железнодорожных магистралей большой длины должны быть отмечены следующие положения.

Специфический характер сети, имеющей вид весьма длинной цепочки с большим числом подстанций, приводит к двум возможным схемам электроснабжения (с одной или двумя ступенями напряжения), описанным в статье С. М. Сердинова. Эти схемы были разработаны и исследованы Теплоэлектропроектом, который пришел к правильным заключениям. Предпочтение, безусловно, следует отдать сети одного напряжения с упрощенными схемами подстанций. Вариант сети двух напряжений приводит, по существу, к появлению двух линий передачи различных напряжений вдоль всей трассы, что, естественно, увеличивает и потери энергии, и расход металла, и, наконец, стоимость всего сооружения. В качестве типового решения следует принять двухцепную линию 110 kV, питающую не только опорные подстанции, но и все тяговые подстанции.

Несомненно, линии электропередачи железнодорожных магистралей, помимо своего прямого назначения—питания тяговых подстанций, могут и должны служить также целям электроснабжения сельскохозяйственных районов, ближайших к железной дороге, и выполнять в некоторой мере задачи межсистемных связей. Однако, принятая С. М. Сердиновым оценка радиуса питания районной нагрузки в 80—100 км мне кажется преувеличенной. Линии 110 kV длиной около 200 км (средняя длина до тяговой подстанции плюс длина радиуса) являются чрезмерно дорогим решением для питания сельскохозяйственной нагрузки. Радиус питания районной нагрузки практически определяется напряжением 10 kV и, может быть, 35 kV.

Использование линий в качестве межсистемных связей возможно лишь в ограниченной степени в связи с большой длиной этих линий. Применение же напряжений более высоких, чем 110 kV, затруднено большим числом подстанций.

Доктор техн. наук, проф. В. Е. РОЗЕНФЕЛЬД

Научно-технический совет Министерства путей
сообщения СССР

Вопросы, поднятые в статье С. М. Сердинова, безусловно заслуживают большого внимания и требуют широкого обсуждения советской технической общественностью.

Действительно, огромный размах электрификации железных дорог Советского Союза, намеченный планом, требует немедленного разрешения ряда вопросов энергоснабжения, без чего немислимо дальнейшее развитие электрической тяги. Автор статьи совершенно прав, когда отмечает взаимное влияние и тесную связь между проблемой электрификации транспорта и проблемой развития электростанций и энергосистем в районах, в которых проходят электрифицируемые дороги.

Следует подчеркнуть, что электрификация ряда железнодорожных участков задерживалась и надолго откладывалась из-за отсутствия электрической энергии, ибо при планировании развития электрических станций и линий электропередачи почти не учитывалась электрическая тяга. Между тем выгодность электрической тяги определяется далеко не одним лишь наличием дешевой и избыточной электрической энергии. Во многих случаях весьма выгодно, а иногда и просто необходимо, осуществлять электрификацию дорог, пролегающих в районах, где отсутствует электрическая энергия. В этих случаях строительство энергосистем должно быть подчинено задачам электрификации транспорта, а отнюдь не наоборот, как это имело место в прошлые годы, когда вопросы электрификации транспорта решались в зависимости от наличных энергетических ресурсов.

Однако ясно, что даже там, где строительство электрических станций и линий электропередачи будет определяться нуждами электрифицируемых дорог, эти дороги явятся (как правильно указывает автор статьи) «артериями», которые будут проводить электрическую энергию в близлежащие районы. Электрическая тяга будет играть создающую роль в электрификации обширных районов нашей страны, содействуя их промышленному, сельскохозяйственному и культурному росту. В этом (помимо чисто транспортного значения) проявляется огромная прогрессивная роль электрической тяги.

Поэтому проектирование всего энергоснабжения электрических железных дорог и проектирование самих тяговых подстанций следует вести комплексно, т. е. с учетом районной нагрузки. Точно так же и планирование энергоснабжения промышленности необходимо проводить с учетом развития электрификации железных дорог.

Приведенные в статье цифры тяговой и, особенно, районной нагрузки, несомненно, являются лишь ориентировочными и не имеют смысла исправлять и уточнять их в процессе настоящего обсуждения. Установление этих цифр, являющихся исходным материалом для решения всей проблемы в целом, представляет собой весьма серьезную задачу, которая должна решаться в плановом, проектном и исследовательском направлениях.

Важным вопросом, подлежащим всестороннему обсуждению, является выбор напряжения для передачи энергии и питания совмещенных тяговых и районных подстанций. Принятые для этой цели напряжения 110 и 35 kV не всегда дают удовлетворительные решения. В ряде случаев может оказаться выгодным промежуточное напряжение. Поэтому своевременно и необходимо пересмотреть шкалу стандартных напряжений и добавить в ней напряжение 60—66 kV.

При решении проблемы питания протяженных железнодорожных магистралей в районах, в которых не имеется достаточно мощных источников энергии, должны проводиться детальные экономические расчеты для выбора расстояний между электрическими станциями. При этом не следует ограничиваться упоминаемыми в статье С. М. Сердинова напряжениями 110 и 154 kV, но рассмотреть также передачу напряжением 220 kV. Выбирая напряжение, следует учитывать современный прогресс и дальнейшие перспективы совершенствования высоковольтной аппаратуры.

Передачу энергии постоянным током придется рассмотреть особо, так как параметры этой системы еще не настолько ясны, чтобы в настоящее время можно было проводить основанные на них технико-экономические расчеты.

Решение задач, возникающих в связи с энергоснабжением протяженных электрифицированных железнодорожных магистралей, не под силу одному Министерству путей сообщения. В эту работу, имеющую большое народнохозяйственное значение, должны включаться, и частично уже включились, также и другие министерства и организации, в первую очередь Министерство электростанций. Координацию научно-исследовательской работы по всей проблеме в целом следовало бы возложить на Академию наук СССР. Только глубокое и комплексное изучение проблемы, детальное обследование районов электрификации, подробное проектное сравнение вариантов, учет новейших и наиболее совершенных типов оборудования элементов системы энергоснабжения и проведение широких технико-экономических исследований обеспечат правильное решение.

Кандидат техн. наук С. М. СЕРДИНОВ

**Главное управление электрификации железных дорог
Министерства путей сообщения СССР**

Отклики на мою статью подтверждают актуальность и серьезность вопроса комплексной электрификации железных дорог и прилегающих районов.

Не имея никаких принципиальных возражений по существу опубликованных замечаний, за исключением неверного выступления А. Н. Саркисова, считаю нужным остановиться лишь на некоторых вопросах.

Неправильно утверждение В. В. Болотова о том, что в некоторых еще слабо освоенных районах Сибири и Севера задача энергоснабжения района может отойти на второй план. Именно благодаря энергетической базе, созданной для электрификации железных дорог, создается стимул для освоения района и мощности электростанций для этого безусловно должны предусматриваться. При этом следует учитывать, что чем больше будет мощность, которая может быть выделена для района, тем быстрее и рациональнее будет осуществляться процесс освоения района.

Вряд ли необходимо в статье, в которой делается лишь попытка осветить принципиальные задачи в области электроснабжения электрических железных дорог, приводить подробные обоснования отдельных второстепенных факторов (где учитываются нагрузки, каково сочетание нагрузок и пр.), как того требует И. И. Иванов, не затрагивающий в то же время основного вопроса — величины нагрузок. Необходимо также отметить, что в потреблении энергии на тягу учтены и прочие транспортные нагрузки, и районные нагрузки привязаны к тяговым подстанциям не в скрытой форме, а вполне определенно, так как размещение тяговых подстанций определяется чисто транспортными условиями вне зависимости от нагрузок района.

Совершенно неправ А. Н. Саркисов, считающий, что говорить о рентабельности и целесообразности электрификации грузонапряженных магистралей можно в перспективе за пределами 1950—1955 гг. и что преимущество в энергоснабжении должно быть отдано важнейшим отраслям промышленности, от которых зависит дальнейший подъем народного хозяйства. Такая точка зрения ошибочна: нельзя противопоставлять железнодорожный транспорт промышленности и народному хозяйству. От развития и перевооружения железных дорог зависит дальнейший подъем народного хозяйства не в меньшей степени, чем от развития промышленности.

Электрификация железных дорог, дающая громадную экономию топлива и сокращение эксплуатационных расходов, есть и будет исключительно рентабельной. Именно высокая технико-экономическая эффективность электрической тяги привела к тому, что по плану послевоенной пятилетки должны быть переведены на электрическую тягу некоторые грузонапряженные магистрали.

Вызывает сожаление, что затронутые в статье и в дискуссии вопросы не получили отклика со стороны работников Академии наук СССР.

Желательны, на что правильно указывает В. Е. Розенфельд, скорейшее изучение и разрешение всей проблемы в целом и разработка методологии комплексного проектирования энергоснабжения электрических железных дорог в увязке с энергоснабжением прилегающих районов.

ОТ РЕДАКЦИИ

Статья С. М. Сердинова „К проблеме энергоснабжения электрических железных дорог большой протяженности“ и развернувшаяся по этой статье дискуссия показали актуальность вопросов планирования и проектирования энергетической базы для электрификации железных дорог СССР. Эти вопросы, решение которых представляется действительно необходимым в связи с намеченным планом широкого развития электрификации транспорта, до настоящего времени не могут быть признаны достаточно изученными. Почти все участники дискуссии подчеркивали, что электрифицированные железные дороги должны учитываться при планировании энергоснабжения наравне с промышленными и другими потребителями. В то же время из дискуссии выяснилось единодушное мнение о необходимости комплексного разрешения проблемы энергоснабжения электрических железных дорог и прилегающих к ним районов. К разрешению проблемы должно быть привлечено внимание Министерства путей сообщения, Министерства электростанций, Академии наук СССР и других организаций.



К статье Ю. В. Баймакова „Интенсифицированные электрические фильтры для пылеулавливания“

(ЭЛЕКТРИЧЕСТВО, № 3, 1947)

Инж. В. Н. УЖОВ

Трест „Газоочистка“ Министерства химической промышленности СССР

Вопросы, затронутые в статье Ю. В. Баймакова, очень интересны и своевременны. К сожалению, трактовка этих вопросов автором в некоторой части спорна, а в некоторой части ошибочна.

В статье не нашли отражения ни опыт эксплуатации современных отечественных электрофильтров, ни научно-исследовательские работы в области электрической газоочистки ведущих организаций, например работы НИОГАЗ. Так, при обзоре применяемых в настоящее время типов электрофильтров автор утверждает, что пластинчатые типы электрофильтров компактнее трубчатых и что трубчатые электрофильтры громоздки и не строятся на производительность свыше 600 м³/мин (36 000 м³/ч).

Это утверждение совершенно не соответствует действительности. В самом деле пластинчатые электрофильтры более громоздки, чем трубчатые, а трубчатые электрофильтры у нас в Советском Союзе строятся на производительность, превышающую указанную в статье, по меньшей мере в 2 раза.

В качестве примера можно указать на электрофильтры: пластинчатый типа ГК-30 и трубчатый типа ДМ-9 конструкции треста „Газоочистка“ на производительность 80 000 м³/ч каждый.

В разделе „Принцип работы электрофильтров“ Ю. В. Баймаков указывает на применение скрубберов только при мокром способе улавливания пыли и, к сожалению, ничего не говорит о другом, более интересном и важном применении скрубберов — для сухого способа электрической очистки. Ряд пылей цветных металлов (окись свинца, окись цинка, окись сурьмы, окись олова и др.) очень плохо заряжается в электрическом поле и плохо улавливается электрофильтром. Вместе с тем, по условиям производства пыль должна быть в сухом, а не в мокром виде. В этом случае газ, подлежащий очистке в электрофильтрах, предварительно пропускают через водные скрубберы в целях ввода в газ пара. Температуру же газа не понижают до точки росы, так что никакой конденсации водяных паров в электрофильтрах не происходит. Ввод пара резко увеличивает к. п. д. электрофильтра (для окиси свинца, например, с 30 до 90%). Электрофильтр резко меняет электрический режим. Работает спокойнее, число разрядов в нем сокращается. Напряжение на нем можно держать более высоким. Пыль начинает хорошо улавливаться, но из электрофильтра получается в сухом виде. Объяснение этому явлению заключается, очевидно, в физическом изменении прилегающего к частице слоя.

Автор статьи дает совершенно неправильную трактовку коэффициента улавливания. Получается, что коэффициент улавливания электрофильтра всегда возрастает при уменьшении содержания количества пыли в газе. На самом деле, наоборот, как правило, увеличение содержания пыли в газе повышает коэффициент улавливания. Коэффициент улавливания (или к. п. д. электрофильтра) выражается следующей зависимостью:

$$\eta = \frac{A_{22} - A_{r2}}{A_{22}},$$

где A_{22} — количество пыли в граммах, содержащееся в 1 м³ неочищенного газа; A_{r2} — количество пыли в граммах, содержащееся в 1 м³ очищенного газа. Практически с увеличением A_{22} η увеличивается, а не уменьшается, как утверждает автор. Кроме того, коэффициент улавливания

и не определяет эффективность очистки. Последняя определяется допустимым количеством пыли в очищенном газе. Автор, далее, рекомендует во всех случаях для предварительного обеспыливания газа установку перед электрофильтром батарейного циклона (мультициклона). Между тем мультициклон может применяться только для сравнительно крупной и сыпучей пыли. Кроме того, он имеет большое гидравлическое сопротивление (60—80 мм вод. ст.) и не всегда может быть применен по экономическим соображениям. Выбор электрофильтра или мультициклона, а тем более их компоновки вместе в каждом отдельном случае должен быть достаточно обоснован.

В разделе „Теория электрического пылеосаждения“ Ю. В. Баймаков большое значение придает явлению электрического ветра; в выводах этого раздела он прямо говорит: „...очевидно, что электрический ветер в основном определяет явление осаждения, а электродинамический процесс лишь дополняет явление“. Это утверждение опровергается практикой работы и опытными исследованиями. Так, работы, проведенные в НИОГАЗ С. П. Жебровским и Н. И. Петуховым по исследованию явления электрического ветра, показали, что величина скорости электрического ветра в условиях электрофильтра не превышает 1,2 м/сек. Известно, что современные электрофильтры работают при скорости газа от 1,0 до 2,5 м/сек (а некоторые даже и до 3,0—3,5 м/сек, например золотые электрофильтры на некоторых электростанциях). При таких условиях электрический ветер не может быть основным фактором, определяющим осаждение пыли в электрофильтрах. Это подтверждается также применением для газоочистки аппаратов, в которых процессы зарядки и осаждения пыли производятся в разных зонах. В так называемом «преципитроне» осаждение пыли происходит в статическом однородном поле, где нет никакого электрического ветра. Такой аппарат работает эффективно и более экономично, чем электрофильтр.

Автор пытается наметить пути интенсификации промышленных электрофильтров.

Повышение производительности электрофильтров — нужное и необходимое мероприятие, но интенсификация связана с определенными производственными затратами (материальными и денежными). Эти затраты допустимы только в том случае, если они компенсируются определенным производственным эффектом.

Ю. В. Баймаков предлагает интенсифицировать электрофильтры путем: 1) уменьшения диаметра коронирующего электрода; 2) уменьшения расстояния между коронирующим и осадительным электродами и 3) обеспечения точности изготовления деталей электрофильтра.

Как известно, процесс электрической очистки газов может быть разделен на следующие три стадии: 1) зарядка частиц (пыли); 2) движение заряженных частиц (пыли) к осадительному электроду; 3) удержание на стенке осадительного электрода осевших частиц (пыли).

Максимальный заряд частицы по Паутенье и Моро:

$$q = 0,19 \cdot 10^{-11} \cdot E \cdot r^2,$$

где q — заряд частицы в кулонах;

E — напряженность поля, или градиент потенциала в В/см;

r — радиус частицы в см. Максимальный заряд, который может получить частица, пропорционален величине напряженности электрического поля.

Движение частицы к осадительному электроду в основном происходит под действием силы электрического поля, равной:

$$F = q \cdot E = 0,19 \cdot 10^{-11} \cdot E^2 \cdot r^2.$$

Сила, действующая на частицу, пропорциональна квадрату напряженности электрического поля. По достижении осадительного электрода слой пыли удерживается на нем как силами сцепления, так и кулоновскими силами (последние прямо пропорциональны напряженности электрического поля). Таким образом, процесс зарядки и осаждения пыли в электрофильтре зависит (в основном) от величины градиента потенциала.

Для трубчатого электрофильтра величина градиента потенциала по Майру выражается следующей формулой

$$E_x = \sqrt{\frac{2i_0\gamma}{k} + \left(\frac{r}{x}\right)^2 \left(E_0^2 - \frac{2i_0\gamma}{k}\right)} \text{ В/см},$$

где i_0 — ток в мА/м;

$k = 1,8 \dots 2,1 \frac{\text{см}}{\text{сек}} \frac{\text{В}}{\text{см}}$ — подвижность ионов;

r — радиус коронирующего провода в см;

$\gamma = 9 \cdot 10^6$;

$E_0 = 31 \cdot \delta \left(1 + \frac{0,38}{\sqrt{\delta r}}\right)$ — критический коронный градиент;

δ — относительная плотность воздуха;
 x — расстояние от оси коронирующего электрода в см.

Ток короны по формуле Дейча для трубчатого элемента выражается формулой

$$i_0 = \frac{2k}{qR^2 \ln \frac{R}{r}} U(U - U_0) \text{ мА/м},$$

где R — радиус внешнего цилиндра в см;

U — приложенное напряжение в кВ;

$U_0 = 31 \cdot \delta \left(1 + \frac{0,308}{\sqrt{\delta r}}\right) \cdot r \ln \frac{R}{r}$ — критическое напряжение

для отрицательной короны в кВ.

Таким образом, и ток и градиент поля зависят в конечном счете от радиусов коронирующего и осадительного электродов и величины приложенного напряжения (влияние среды мы не рассматриваем).

Каким же способом целесообразнее всего увеличивать величину градиента в электрофильтре? Единственно правильным решением является увеличение диаметра коронирующего электрода без изменения расстояний между электродами, а не наоборот, как рекомендует Ю. В. Баймаков.

В таблице приведены результаты подсчета величины градиента для различных радиусов коронирующего электрода в трубчатом элементе.

Как следует из приведенной таблицы, градиент потенциала может быть повышен путем увеличения диаметра коронирующего электрода.

Как же будет выглядеть практически интенсификация существующих электрофильтров?

Величина напряженности поля трубчатого элемента в зависимости от радиуса коронирующего электрода

Радиус коронирующего электрода, см	Критическая напряженность E_0 , В/см	Напряженность у стенки трубы E_R , В/см	Напряженность средняя по сечению $E_{ср. сеч.}$, В/см	Напряженность средняя по радиусу $E_{р. рад.}$, В/см	Критическое напряжение U_0 , В	Ток i_0 , мА/м	$\frac{E_R}{E_0}$ при (r_1)	$\frac{E_{ср. сеч.}}{E_{ср. сеч.}}$ при (r_1)	$\frac{E_{р. рад.}}{E_{ср. рад.}}$ при (r_1)
$r_1 = 0,05$ $R = 12,5$	73 600	1 130	1 320	2 230	17 800	0,15	1,0	1,0	1,0
$r_2 = 0,25$ $R = 12,5$	50 000	1 510	2 200	4 170	49 000	0,15	1,34	1,67	1,87
$r_3 = 0,5$ $R = 12,5$	44 900	2 111	3 400	5 900	72 000	0,15	1,86	2,57	2,65

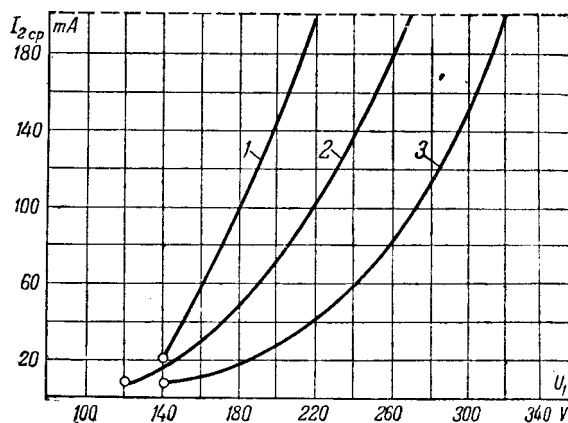


Рис. 1. Вольтамперные характеристики наиболее распространенных типов сухих электрофильтров.

1 — характеристика электрофильтра ДВМ-1; 2 — характеристика электрофильтра ХК-45; 3 — характеристика электрофильтра СС-8; пунктиром показаны номинальные значения электроагрегата ТУ-2.0.

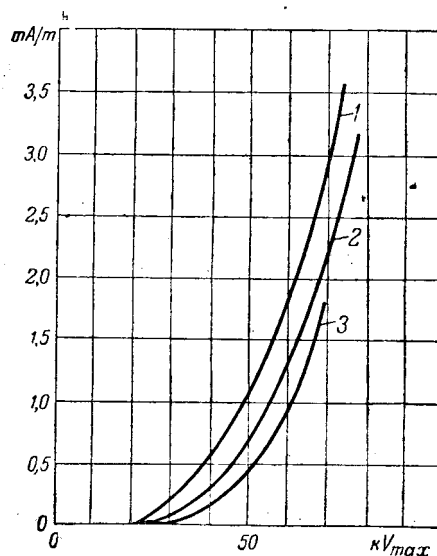


Рис. 2. Зависимость тока короны от величины приложенного напряжения для трубчатого электрофильтра для диаметра трубы 150 мм и для разных диаметров коронирующих электродов.

1 — диаметр коронирующего электрода 1 мм; 2 — диаметр коронирующего электрода 2 мм; 3 — звездчатый шестигранный электрод с диаметром описанной окружности 6 мм.

По способу, предлагаемому Ю. В. Баймаковым, следует уменьшить диаметр коронирующих электродов, но в существующих электрофильтрах коронирующие электроды сделаны из проволоки диаметром $2,0 \div 2,2$ мм. Если учесть, что длина этих электродов $5 \div 7$ м, что они подвергаются механическим нагрузкам при встряхивании и при вибрации, под действием электрических и аэродинамических сил, и что в ряде случаев они подвергаются воздействию высокой температуры, кислой среды, абразивному действию пыли, то оказывается, что из-за понижения механической прочности уменьшать диаметр коронирующих электродов нельзя.

Далее, по способу, предлагаемому Ю. В. Баймаковым, следует уменьшить расстояние между коронирующими и осадительными электродами. Если это сравнительно несложно выполнить в пластинчатых электрофильтрах, то это неосуществимо в трубчатых аппаратах, в которых придется заменить осадительные электроды трубами меньшего диаметра. Практически это будет означать полную реконструкцию электрофильтра, его демонтаж, замену трубных решеток, усиление конструкции подвеса труб из-за увеличения веса труб, монтаж новых труб и всей верхней части электрофильтра.

Кроме того, замена труб на меньший диаметр уменьшит полезную площадь для прохода газа (увеличит гидравлическое сопротивление электрофильтра), т. е., по существу, уменьшит производительность электрофильтров.

Наконец, Ю. В. Баймаков, предлагая способы интенсификации электрофильтров, упускает из вида еще одно существенное обстоятельство. Дело в том, что для питания электрофильтров в СССР применяются почти исключительно электроагрегаты производства б. Московского рентгеновского завода, типов ТУ-200 и ТУ-335. Эти агрегаты имеют следующие номинальные электрические данные: мощность 18 kVA напряжение 380/72 000 В, выпрямленный ток 200 мА.

Вольтамперные характеристики наиболее распространенных типов электрофильтров приведены на рис. 1.

Из характеристик видно, что электроагрегаты при полной нагрузке по току (около 200 мА) недоиспользуются по напряжению (по первичной стороне $200 \div 270$ В). Поэтому увеличение тока электрофильтра связано с установкой дополнительных электроагрегатов (с расширением подстанций) и с дроблением электрофильтра на отдельные самостоятельные секции.

Замена же коронирующих электродов более толстыми никакой технической сложности не представляет. При такой замене: а) увеличивается прочность электродов и продолжительность их жизни; б) легко достигается увеличение градиента потенциала в электрофильтре за счет повышения напряжения на электродах; в) не увеличивается нагрузка на электроагрегаты и не требуется расширения подстанций; г) улучшается использование электроагрегатов.

На рис. 2 приведены зависимости тока короны от напряжения при разных диаметрах коронирующего электрода.

Таким образом, интенсификацию электрофильтров следует производить путем увеличения диаметра коронирующих электродов, а не так, как предлагает Ю. В. Баймаков.

В разделе «Питание электрофильтров» автор статьи рекомендует отказаться от вращающихся механических выпрямителей и перейти к кенотронам, газотронам или твердым выпрямителям. В этот вопрос следует внести ясность. Вращающиеся механические выпрямители имеют некоторые присущие им недостатки, но все же в условиях эксплуатации они являются достаточно надежными, работоспособными аппаратами. Этого нельзя сказать про кенотроны и газотроны. Учитывая, что мощность, потребляемая современными электрофильтрами, может достигать 20 и даже 30 kVA, что электрофильтры работают в режиме протекающих коротких замыканий и, наконец, что кенотроны и газотроны недолговечны, рекомендовать их вместо вращающихся механических выпрямителей для питания электрофильтров нельзя (за исключением лабораторных и опытных установок).

Для этих установок возможно применение только вакуумных выпрямителей.

В разделе «Питание электрофильтров постоянным током» автор рекомендует для аппа-

ратов, в которых газ находится секунды или десятые доли секунды, применять однополупериодную схему выпрямления, а для аппаратов, в которых газ находится 0,1 sec и больше, применять двухполупериодную схему выпрямления.

Работы проведенные в НИОГАЗ и тресте «Газоочистка» (В. И. Попковым, Н. И. Петуховым, В. Н. Ужовым, И. Н. Востоковым и др.), показывают, что выбор схемы питания электрофильтра зависит от вольтамперных характеристик электрофильтра и его технологических параметров, а не от времени пребывания газа в электрическом поле.

Доктор техн. наук, проф. Ю. В. БАЙМАКОВ

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

Моя статья посвящена вопросу исследования и работы интенсифицированных электрофильтров, позволяющих достигать малого времени пребывания газа в электрофильтре при коэффициенте проскока, равном нулю. Эти исследования проводились в период 1940—1945 гг. Я считал необходимым познакомить широкий круг читателей с этими чисто экспериментальными работами и высказать мое мнение на основании полученного опыта в отношении развития техники сооружения фильтров. Поэтому в начале моей статьи (принцип работы электрофильтра) я очень кратко касаюсь практики, давая лишь обзор существующего, но все же на стр. 60 журнала я упоминаю о том, что изменением влажности газа можно достичь повышения коэффициента улавливания. Полагаем, что читателю будет без пояснений ясно, что это достигается каким-либо способом предварительного увлажнения газа, электрофильтр же работает при температуре выше точки росы.

Этот способ обработки газа никоим образом не следует смешивать с обработкой газа в электрофильтрах-скрубберах, где газ охлаждается до температуры ниже точки росы, а затем попадает в электрическое поле электрофильтра. Пыль смывается с электродов орошением. Эти электрофильтры-скрубберы обладают высоким коэффициентом очистки, и их нередко применяют в тех случаях, когда требуется хорошая очистка газа при наличии трудноулавливаемой пыли.

В. Н. Ужов обвиняет меня в неверном понимании сущности коэффициента пылеулавливания. Если в выра-

жение $\eta = \frac{S_n}{c}$ (стр. 62) подставить выражение (4), то

получится как раз то, что В. Н. Ужов приводит в своей заметке.

В. Н. Ужов пишет: «Автор далее рекомендует во всех случаях для предварительного обеспыливания газа установку перед электрофильтром батарейного циклона (мультициклона)». Мною же написано: «поэтому, где только можно, вводится предварительное обеспыливание газа. Наиболее пригоден для этой цели мультициклон, который может дать коэффициент улавливания до 0,9». Неужели В. Н. Ужов допускает мысль, что я буду рекомендовать мультициклон, например, для налипающих пылей? К сведению В. Н. Ужова могу сообщить, что на одном из наших глиноземных заводов мультициклон работает с коэффициентом улавливания — 0,97.

В. Н. Ужов утверждает, что электрофильтр камерного типа более громоздок по сравнению с трубчатым. Воспользуемся размерами, которые приводит В. Н. Ужов. На производительность в 1 м^3 в минуту газа объем камерного электрофильтра равен $1,5 \text{ м}^3$, трубчатого — $2,3$.

Когда я писал о трубчатых и камерных электрофильтрах приводилась производительность одной секции. Совершенно естественно, что сочетанием нескольких секций можно получить значительно большую производительность.

Возражения В. Н. Ужова о том, что электрический ветер в электрофильтре играет подчиненную роль, необидительны. Он ссылается на данные работы С. П. Жебровского и Н. И. Петухова. Эта работа интересна тем, что она подтверждает данные Ладенбурга и Титце о величинах электрического ветра в электрофильтрах. Мои

соображения о характере аэродинамических явлений между проволокой и осадительным электродом достаточно ясно изложены в моей статье. Авторы измеряли средневзвешенные скорости в среде, наполненной турбулентными потоками. Допустим, что явление электрического ветра протекает именно с теми скоростями, которые измерены в НИОГАЗ, даже и в этом случае скорость достигает 1—2 м/сек, что значительно выше, чем скорость движения частиц в электрическом поле. На самом же деле, скорость отдельных струй электрического ветра, вызываемого коронирующей точкой, много выше величины 1—2 м/сек. Мне приходилось наблюдать сдувание капель жидкости с осадительных электродов, вызываемое струями значительно большей скорости. Такие же наблюдения, но с отбрасыванием песчаных частичек, были сделаны М. А. Вейнер в физикотехническом институте в 1930 г.

Весьма неудачна ссылка на работу пресипитрона. Известно, что пресипитрон работает на принципе протекания ламинарного потока ионизированного газа в однородном электрическом поле, принципе, отличном от принципа работы обычного электрофильтра. Поэтому конструкторы пресипитронов стараются сблизить электроды или пропускают газ через волокнистые металлические тела, сетки для того, чтобы путь осаждения частиц был наикратчайшим. Форсированная работа пресипитрона связана с заметным понижением коэффициента улавливания. Пресипитроны применяются, главным образом, для обеспыливания воздуха и газов (небольшые концентрации пыли в газе), а не для целей промышленного пылеулавливания.

Теперь о главном: В. Н. Ужов считает неправильным основное положение, заключающееся в том, что уменьшение диаметра коронирующего электрода ведет к интенсификации процесса пылеулавливания, и, наоборот, рекомендует интенсифицировать процесс улавливания увеличением диаметра коронирующего электрода.

Утверждение это глубоко ошибочно. Полнота процесса осаждения пыли зависит от ионизации газа в зоне коронирующего электрода. Чем меньше диаметр коронирующего электрода, тем выше искажение электрического поля. Процесс ионизации будет интенсивнее в связи с ростом напряженности поля в зоне короны и, следовательно,

тем интенсивнее будет сила тока коронирования, тем интенсивнее будут протекать электродинамические и аэродинамические явления.

Что же мы видим из анализа данных, приведенных В. Н. Ужовым? U_0 растет с увеличением радиуса коронирующего электрода, сила тока коронирования i_0 падает с ростом U_0 , поэтому для поддержания i_0 постоянным приходится увеличивать U — напряжение, прикладываемое к электрофильтру. С увеличением радиуса коронирующего электрода падает критическая напряженность поля E_c . С электродом радиуса 0,05 см мы получаем напряженность поля $E_0 = 73\,000$ В при $U_0 = 17\,800$ В и при силе тока коронирования 0,15 мА/м. При радиусе электрода 0,5 см мы получаем эту же силу тока при $U_0 = 72\,000$ В и E_0 равно 44 900 В, т. е. мы получаем напряженность E_0 1,6 раз меньше, и вынуждены для этого приложить напряжение в 4 раза большее и для того, чтобы получить напряженность у стенки 2 100 В взамен 1 100 В. Какая же это интенсификация? Разве напряженность у стенки играет решающую роль? При радиусе электрода в 0,05 см мы получаем $i_0 = 0,15$ мА/м при 17,8 кВ приложенного напряжения, следовательно, мы имеем большой запас; повышая напряжение, мы достигнем значительно большей силы тока коронирования.

У меня создалось впечатление, что В. Н. Ужов находится под большим впечатлением принципа работы пресипитрона и пытается ошибочно перенести этот принцип на электрофильтр с коронирующим электродом.

Касаясь вопроса интенсификации, В. Н. Ужов пишет о том, что существующие фильтры надлежит ремонтировать. Едва ли кто-нибудь на это пойдет. Но существующие типы электрофильтров нужно и можно в дальнейшем сделать более производительными, заменяя питающие подстанции более совершенными схемами, стремясь уменьшить радиус коронирующего провода.

Путь интенсификации процесса электрофильтрации далеко не так прост, как это склонен представлять себе В. Н. Ужов, и создание промышленных интенсифицированных электрофильтров потребует большой работы конструкторов и исследователей, базирующихся на правильном понимании физической сущности процесса.

ОТ РЕДАКЦИИ

Вопросы электрогазоочистки имеют для промышленности очень большое значение. Ю. В. Баймаковым в опубликованной в журнале „Электричество“ статье подняты интересные вопросы, связанные с повышением интенсивности действия электрофильтров. Дискуссия по этому вопросу показывает, что в разработке и исследовании процессов, имеющих место в электрофильтрах, еще нет достаточно установившихся взглядов на самые основные явления. В частности, это относится и к такому вопросу, как роль коронирования в процессе пылеулавливания. От правильного понимания роли коронирования электрода зависит и направление в дальнейшем подходе к созданию более рациональных конструкций электрофильтров.

Приходится констатировать, что работа ряда специалистов в области электрофильтров не координирована. Это достаточно ясно видно из дискуссии. Весьма желательно, чтобы ВНИТОЭ для обеспечения более полного взаимопонимания инженеров, работающих в области электрогазоочистки, организовало научно-техническую сессию по вопросам электрогазоочистки.



Новые исследования конденсаторов

При исследовании бумажных металлизированных конденсаторов большое значение имеет определение зависимости числа пробоев от величины приложенного напряжения для образцов металлизированной бумаги [Л. 1]. Испытание проводится на установке, снабженной электромагнитным счетчиком, подсчитывающим число пробоев (после каждого пробоя электрическая прочность образца восстанавливается вследствие испарения или окисления тонкого слоя металла возле места пробоя). Напряжение, подведенное к образцу, повышается ступенями по $10 \div 25$ В, с выдержкой на каждой ступени по 1 мин. При первом цикле испытаний, доведенном до напряжения $350 \div 400$ В, отдельные пробои наблюдаются уже при напряжении порядка 100 В; при напряжении $200 \div 250$ В за 1 мин происходит уже до $10 \div 15$ пробоев, при $300 \div 350$ В происходит несколько десятков пробоев; дальнейшее повышение напряжения дает уже резкое повышение числа пробоев (до 100 пробоев в минуту и более). При повторных циклах испытания того же образца до напряжения 250 В пробой обычно совершенно не имеют места; резкое возрастание числа пробоев наблюдается только при напряжении выше $325 \div 350$ В.

Результаты испытания показывают, что, применив тренировку при повышенном напряжении, можно обеспечить отсутствие пробоев до напряжения 250 В.

Процесс самовосстановления металлизированной бумаги после пробоя и характер зависимости числа пробоев в единицу времени от приложенного напряжения определяется двумя факторами: толщиной слоя металла (характеризуется проводимостью этого слоя) и энергией, подводимой к месту пробоя (регулируется величиной активного сопротивления, включаемого последовательно с испытуемым образцом). Были проведены опыты с цинковыми слоями различной толщины, имеющими сопротивление $10; 20$ и 30Ω при длине ленты бумаги в 1 фут и ширине в 1 дюйм. (Это соответствует сопротивлению слоя, рассчитанному на 1 см длины и 1 см ширины поверхности бумаги соответственно: 0,8; 1,6 и 2,5 Ω). Германская металлизированная бумага имела обычно сопротивление около

$10 \times \frac{\text{см}}{\text{см}}$. Толщина бумаги, на которую был нанесен слой

цинка, составляла 10 μ . Опыт показал, что наилучшие условия для самовосстановления можно получить, применяя последовательное сопротивление в 1 М Ω . Скорость самовосстановления оказалась наивысшей у самого тонкого

слоя (с сопротивлением $2,5 \Omega \cdot \frac{\text{см}}{\text{см}}$), однако и наиболее

толстый слой ($0,8 \Omega \cdot \frac{\text{см}}{\text{см}}$) показал вполне удовлетворительное самовосстановление.

При сравнительных исследованиях обычной и металлизированной конденсаторной бумаги установлено, что последняя имеет заметно повышенную диэлектрическую прочность, особенно при испытании образцов, составленных из нескольких слоев, наложенных стопкой друг на друга. Это объясняется уменьшением эффективной толщины диэлектрика и увеличением поверхности соприкосновения бумаги с электродами в случае металлизированной бумаги. Для образцов, сложенных из нескольких листов металлизированной бумаги, установлено, что если прикла-

дывать металлизированную сторону каждого последующего листка к неметаллизированной стороне предыдущего, емкость образца будет меньше, чем если складывать соседние листки металлизированными (или, соответственно, неметаллизированными) сторонами друг к другу.

Можно было опасаться, что повышение сопротивления металлизированного слоя даст резкое увеличение угла потерь по сравнению с обычными конденсаторами с обкладками из фольги; приведенный расчет [Л. 1] показывает, что при правильном конструировании конденсаторов из металлизированной бумаги величину угла потерь можно довести до таких же значений, как и у обычных бумажных конденсаторов.

Описана также разработанная и внедренная методика испытания на пробой бумажных конденсаторов, рассчитанных на работу в цепях постоянного тока [Л. 2]. На производстве производится испытание на пробой каждого изготовляемого конденсатора, поэтому при приемно-сдаточных испытаниях достаточно испытывать только определенную часть сдаваемой партии, причем количество отбираемых конденсаторов должно показать удовлетворительность «среднего уровня качества». Для отбора проб при испытании конденсаторов пользуются следующей таблицей, составленной на основе использования статистических методов.

Количество конденсаторов в сдаваемой партии	Количество отбираемых на испытание образцов		Допускаемое количество бракуемых конденсаторов	
	Первая проба	Вторая проба	В первой пробе	Суммарное, в обеих пробах
До 299	25	50	0	1
$300 \div 499$	35	70	0	2
$500 \div 799$	50	100	1	3
$800 \div 1\,299$	75	150	2	4
$1\,300 \div 3\,199$	100	200	2	6
$3\,200 \div 7\,999$	150	300	3	9
$8\,000 \div 21\,999$	200	400	4	11

Если брак при испытании первой пробы превышает допускаемое для первой пробы значение, но не превышает суммарного значения, допускаемого для двух проб, то берется вторая проба. Если после испытания второй пробы суммарное количество брака от первой и второй пробы не превышает допускаемого суммарного брака для двух проб, то партия считается годной. Если же при испытании второй пробы суммарное количество брака будет более допускаемого, а также если при испытании первой пробы количество брака будет более суммарного, допускаемого для двух проб, то для данной партии конденсаторов необходимо провести испытание всех без исключения конденсаторов.

При испытании на пробой конденсаторов данного типа предусматриваются следующие виды испытания:

а) Испытание между выводами (определение электрической прочности диэлектрика) производится

напряжением, в два раза большим нормированного рабочего в течение 15 sec. или напряжением в 2,5 раза большим рабочего в течение 1 sec.

б) Испытание на корпус производится между каждым из выводов и корпусом. При рабочем напряжении 600 В или ниже испытательное напряжение берется равным четырехкратному рабочему; при рабочем напряжении более 600 В испытательное напряжение берется равным удвоенному рабочему плюс 1 000 В; выдержка под напряжением в обоих случаях берется равной 1 sec.

в) Испытание между секциями (при наличии в конденсаторе нескольких секций с изолированными выводами) производится удвоенным рабочим напряжением в течение 1 sec.

При испытательном напряжении до 5 kV напряжение подводится к конденсаторам при помощи щупов с изоляционными рукоятками; щупы соединяются с источником высокого напряжения гибкими проводниками, помещенными в металлические заземленные экраны. На рукоятках щупов помещены кнопки, при помощи которых включается цепь питания анодов в выпрямительной установке высокого напряжения. По окончании испытания, не отнимая от щупов выводов конденсатора, выключают кнопки; при этом конденсатор отключается от источника напряжения и разряжается через специальное разрядное сопротивление, предусмотренное в схеме.

При испытательном напряжении свыше 5 kV из соображений техники безопасности необходимо производить испытание каждого конденсатора в отдельности в изолированной «клетке». При открывании дверей клетки при помощи специальной блокировки напряжение с конденсатора снимается, и он разряжается на специальное разрядное сопротивление. Приведены [Л. 2] разработанные стан-

дартные схемы установок для испытания конденсаторов в пробой. При испытании конденсаторов, рассчитанных на работу в цепях постоянного тока, надо учитывать, что они не пригодны для работы при переменном токе и не рассчитаны на пропускание больших токов. Поэтому как заряд, так и разряд этих конденсаторов должны носить аperiodический характер, а толчки тока в момент заряда и разряда не должны превышать 1 А. В упомянутых выше схемах эти требования к испытанию удовлетворяются с помощью ограничительных сопротивлений. По этой же причине нельзя одновременно производить испытание двух конденсаторов, соединенных параллельно; в момент пробы одного конденсатора происходит разряд второго, причем в этом случае мгновенное значение силы тока может значительно превысить допустимый предел, а характер разряда может быть периодическим. Если заряженный конденсатор в процессе испытания отсоединить от источника напряжения, то по истечении нормального времени испытания при разряде конденсатора иногда наблюдаются случаи пробоя, хотя при разряде сила тока ограничивается допустимым значением (1 А), а разряд имеет аperiodический характер. Автор не объясняет это явление, но, ссылаясь на него, рекомендует не допускать отсоединения испытываемого конденсатора от источника напряжения в процессе испытания.

Литература

1. P. Godley, J. Baisbaugh, Electronics, т. 20, №1 стр. 112—116. 1947.
2. R. Hopkins, Electronics, т. 20, № 6, стр. 105—106. 1947.

Кандидат техн. наук В. Т. РЕННЕ

Исследования муфт для кабелей со сжатым газом

Исследовались [Л. 1] муфты для кабелей с вязкой пропиткой, внутри которого после прокладки вводится сухой азот с постепенным доведением давления до 14 ат.

Электрическая прочность пропитанной вязкими составами бумажной изоляции при длительном приложении напряжения и атмосферном давлении составляет в радиальном направлении 150 kV/cm, а в продольном направлении всего 10 kV/cm. Повышение давления не увеличивает электрической прочности бумажной изоляции в продольном направлении.

При проектировании соединительных муфт кабелей со сжатым газом принимается, что максимальные величины радиальной составляющей градиента электрического поля в них не должны превышать 70% от соответствующих величин на жиле кабеля. Поэтому толщина изолирующего слоя в муфте больше, чем в кабеле (рис. 1). Для сечений жил меньше 320 мм² диаметры муфты не уменьшаются, а увеличиваются, что обусловлено известным J -образным изменением градиента напряжения в зависимости от отношения радиусов внутреннего и наружного цилиндров.

Малая пробивная напряженность в продольном направлении вызывает необходимость расчета переходной кривой между диаметром кабеля ($2a$) и диаметром муфты ($2R$). Эта кривая с достаточной для практики точностью определяется из предположения радиального поля в муфте; потенциал любой точки находится по обычной формуле для коаксиальных цилиндров. Принимается, что при рабочем напряжении градиенты в продольном направлении не должны превышать 2,6, а при перенапряжениях 1,5 kV/cm.

Были проведены импульсные испытания волнами обеих полярностей 2/50 мкс на отрезках кабеля длиной 18,3 м с двумя концевыми муфтами и одной соединительной муфтой посередине. Кратность испытательных напряжений по отношению к номинальному напряжению кабелей была взята от 7,2 (при номинальном напряжении 33 kV) до 5,7 (при номинальном напряжении 264 kV).

При испытании 424 импульсами шести опытных соединительных муфт 132-kV кабеля со сжатым газом первые

три соединительные муфты были повреждены на первом импульсе после изменения полярности волны (рис. 2). Разрушение слоистой бумажной изоляции происходит значительно более интенсивно при изменениях полярности импульсных волн.

Значительное внимание уделено выяснению причин повреждений изолирующего слоя муфт путем измерения сопротивления изоляции немедленно после каждого импульса во время импульсных испытаний. После каждого заряда жила кабеля отсоединялась от импульсного генератора и присоединялась к гальванометру. Обнаружено, что разрядный ток, после первого заряда имел большую величину, чем после последующих зарядов той же полярности волны; обычно величина разрядного тока после 6—10 последовательных зарядов уменьшалась примерно до 30% с величины разрядного тока после первой волны. При изменении полярности волны величины разрядного тока достигали прежнего значения (рис. 3). Уменьшение разрядного тока наблюдалось также на муфтах, подвергнутых действию последовательных волн напряжения, и оставленные

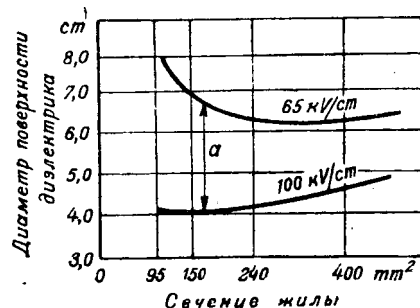


Рис. 1. Дополнительная толщина изолирующего слоя в муфтах 132 kV кабеля со сжатым газом.

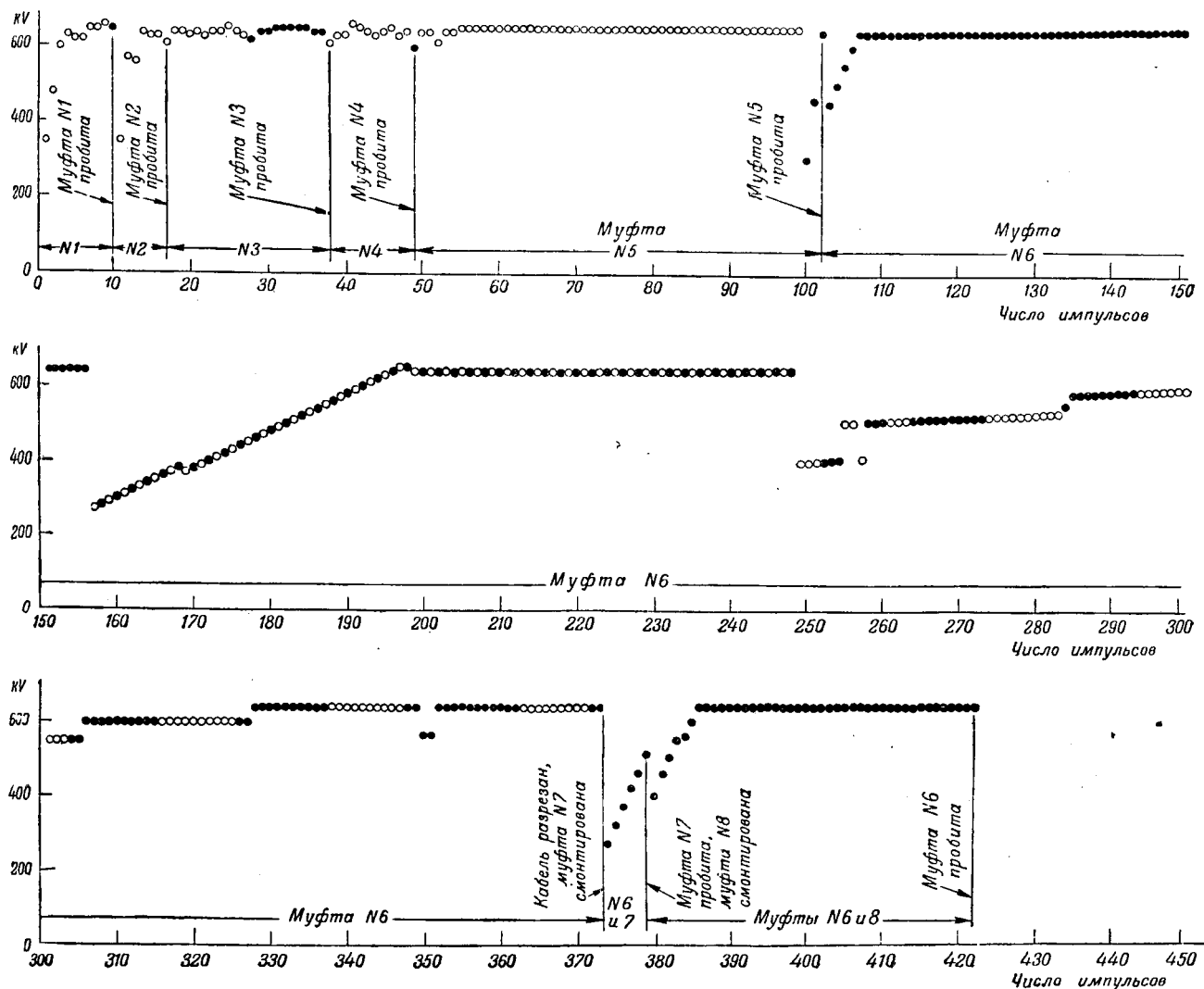


Рис. 2. Результаты испытаний импульсами опытных муфт. ○ — положительная волна; ● — отрицательная волна.

и более в течение значительного периода времени (около 100 ч).

В результате импульсных испытаний установлено, что при рабочем напряжении можно допустить следующие значения градиентов: для радиальной составляющей градиента на шпиге — 65, для тангенциальной составляющей градиента на профиле — 2 и для градиентов на ступенях изолирующего слоя — 2 kV/cm.

Выяснено, что и при импульсах отношение пробивной прочности в продольном направлении к пробивной прочности в радиальном направлении остается чрезвычайно низким. Эти опыты подтвердили результаты исследований [Л. 2], показавших, что импульсная пробивная прочность в продольном направлении для муфт кабелей давления составляет около 2 kV/cm.

Испытания импульсами кабелей со сжатым газом [Л. 3] показали, что максимальные пробивные градиенты при однократном импульсе около 1 000, а при наличии повторных импульсов 900 kV/cm.

Ранее считалось, что максимальная величина радиальной составляющей градиента напряжения в кабеле со сжатым газом при напряжении переменного тока допустима не выше 93,5 kV/cm. Однако исследования [Л. 1] показали, что эта величина может быть повышена до 125 kV/cm, что дало возможность значительно снизить стоимость кабельной линии.

Перенапряжения в значительной степени определяют конструктивные размеры и стоимость кабеля и муфт. Поэтому в установках, где кабели присоединены к системе воздушных линий, значительное распространение получили молниезащиты. Их применение позволяет выбирать конст-

рукции кабеля и муфт, ориентируясь лишь на несколько более высокие градиенты напряжения, чем в нормальном режиме.

Особое внимание следует обращать на защиту кабельных линий от коммутационных перенапряжений. По мнению выступавших в дискуссии по докладу [Л. 1], не следует забывать также о защите от атмосферных разрядов (предполагается последовательное соединение кабельной линии с воздушной или перенапряжения в кабельной линии в связи с разрядами от открытой части подстанций). По мнению Ирвинга, принятые Brazier максимальные величины коммутационных перенапряжений завышены, и в действительности они не превышают 4-кратной величины рабочего напряжения. Ирвинг приводит опыт эксплуатации энергосистемы 132 kV за 17 лет, в течение которых были зарегистрированы только два случая коммутационных перенапряжений с амплитудой 500 ÷ 600 kV. Число перенапряжений от атмосферных воздействий составляло приблизительно 1 на 160 км линии в год.

Другим мероприятием по уменьшению конструктивных размеров кабеля и муфт могло бы быть повышение импульсной прочности самого диэлектрика. Импульсная пробивная прочность отдельных слоев пропитанной бумаги [Л. 3] около 2 000 kV/cm, тогда как импульсная прочность кабеля и муфт около 1 000 kV/cm. Учитывая незначительное влияние на импульсную прочность кабеля технологии изготовления изолирующего слоя, некоторые авторы считают величину 1 000 kV/cm заниженной и выдвигают требование об ее экспериментальном уточнении.

В конструкциях концевых муфт для защиты бакелизированного бумажного изолятора от атмосферных влияний

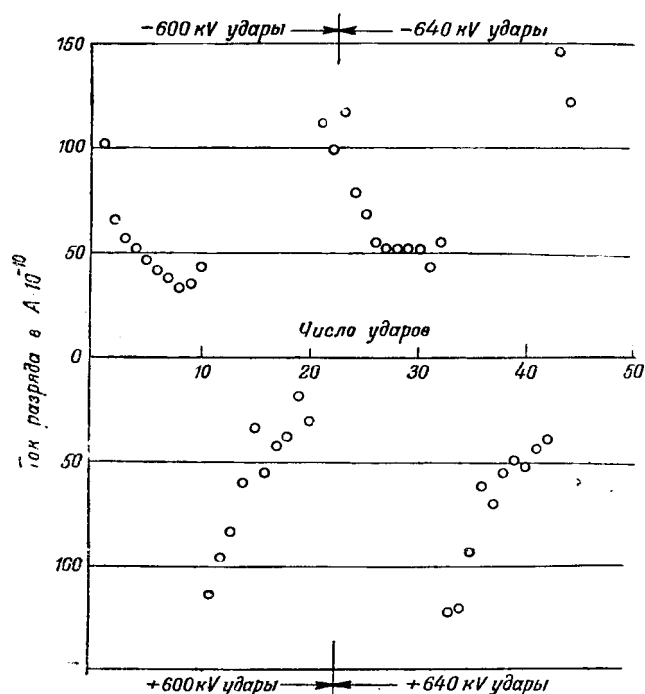


Рис. 3. Разрядный ток через диэлектрик муфты, после приложения последовательных импульсов одинаковой полярности.

применены фарфоровые изоляторы, рассчитанные на внутреннее рабочее давление до 17,5 ат.

Для улучшения распределения электрического поля вдоль фарфора и устранения мест с значительным повышением градиентов напряжения применена полупроводящая глазурь.

Определение распределения напряженностей поля в концевых муфтах производилось на электролитических моделях, причем обнаружено, что в близком соседстве от конца металлизированного конуса имеет место резкое возрастание тангенциальных составляющих градиентов напряжения вдоль бумажного цилиндра до 20 кВ/см.

Согласно английскому стандарту тангенциальные составляющие градиентов напряжения в муфте не должны превышать 2,6, а радиальные составляющие у конца конуса — 8,5 кВ/см. Эти величины определяют длину конуса в муфтах. Пропиточный состав для заполнения концевых муфт должен обладать достаточной вязкостью, чтобы избежать проникновения в кабель при тепловых циклах. Хорошие результаты дает состав вязкостью около 80 пуаз при 20° С.

Образцы кабелей со сжатым газом, с концевыми и соединительными муфтами на номинальное напряжение 132 кВ были испытаны 700 волнами амплитуды 640 кВ без пробоев и частичных повреждений. Кроме того, на аналогичных образцах кабеля были выполнены: а) длительные испытания при одновременном приложении циклов нагрева и охлаждения и при напряжении в 1,3 раза больше рабочего напряжения кабеля; б) кратковременные ускоренные испытания при одновременном приложении циклов нагрева и охлаждения и при напряжении в 1,3 раза больше рабочего напряжения кабеля. Затем концевые муфты были испытаны на перекрытие при кратности по отношению к номинальному напряжению 4,6 ÷ 5,6 (при сухоразрядном испытании) и 3,7 ÷ 4,5 (при мокроразрядном испытании).

Для испытания концевых муфт при низкой температуре на концевую заделку образца кабеля надевался специальный чехол и в него помещалось 40 кг твердой СО₂. Это позволило поддерживать внутри чехла температуру до — 15° С в течение 24 ч.

В статье [Л. 1] описаны способы определения мест утечки газа.

Литература

1. L. G. Brazier. JIEE. ч. II, т. 93, № 35, 1946.
2. H. Halperin, G. Shanklin. Trans. AIEE, стр. 1190, 1944.
3. R. Davis. JIEE, ч. II, т. 89, стр. 52, 1942.

Кандидат техн. наук И. Г. ГЕРЦЕНШТЕЙН

Обзор развития турбогенераторов на 3 600 об/мин. El. Eng., № 4, стр. 352-354, 1947.

После 1930 г. рост мощности турбогенераторов на 3 600 об/мин ограничивался электрической частью. К 1936 г. была усовершенствована вентиляция лобовых частей обмотки ротора, улучшены поковки для генераторного зал и применена более совершенная динамическая балансировка. Важным усовершенствованием было введение водородного охлаждения, при котором значительно увеличился коэффициент теплоотдачи и снизились вентиляционные потери, что позволило поднять мощность турбогенераторов без увеличения их размеров.

Для вентиляции турбогенераторов была введена многоструйная система для статора и подпазовые каналы и вентиляционные отверстия в зубцах ротора, а также каплях. Крепления лобовых частей обмотки ротора конструируются таким образом, чтобы обеспечить наибольшую поверхность охлаждения при наиболее эффективных скоростях воздуха. Отмечаются некоторые конструктивные особенности главного генератора электростанции Sewage. Генератор имеет пропеллерные вентиляторы с профилированными лопатками. Такие вентиляторы требуют относительно немного места на валу ротора. Охлаждение генератора — водородное, с необычайно высоким избыточным давлением водорода — 1 ат. Такое давление позволяет увеличить мощность генератора на 15% против мощности допустимой при обычном давлении водорода 0,035 кг/см² или на 35% против мощности при воздушном охлаждении.

Турбогенераторы на 3 600 об/мин начали вытеснять электростанций более громоздкие четырехполюсные машины. Можно ожидать, что четырехполюсные машины будут совершенно вытеснены двухполюсными в связи с конструированием агрегата на 100 000 kW, 3 600 об/мин, который будет работать при давлении пара 105,5 ат и при температуре перегрева 565° С. Могут быть построены турбогенераторы на 3 600 об/мин, мощностью до 150 000 kW и выше.

Кандидат техн. наук В. В. ЕНЬЮ

Новый тип электрического транспортного механизма. El. Times, стр. 296-297, № 2914, 1947; Bull. ASE, стр. 353-355, № 12, 1947.

До последнего времени в электротехнике прочно установилось мнение о том, что наиболее подходящим средством для длительного аккумулирования и расходования электрической энергии являются аккумуляторные батареи того или иного типа. С другой стороны, наиболее рациональным (в техническом и экономическом отношении) средством для мгновенного (моментального) аккумулирования и использования энергии являются электромеханические аккумуляторы в виде вращающихся маховиков, применение которых, в частности, представляют электроприводы неререверсивных прокатных станов.

Однако ряд соображений в последнее время привел к выводу, что электромеханические аккумуляторы-маховики могут с успехом применяться и для длительного аккумулирования энергии и для некоторых видов электрифицированного транспорта.

Электрические транспортные механизмы используют либо непосредственный съем энергии из контактной сети или третьего рельса, или получают питание от установочных на них аккумуляторов. Общим этим системам присущи недостатки, поскольку в аккумуляторных транспорт

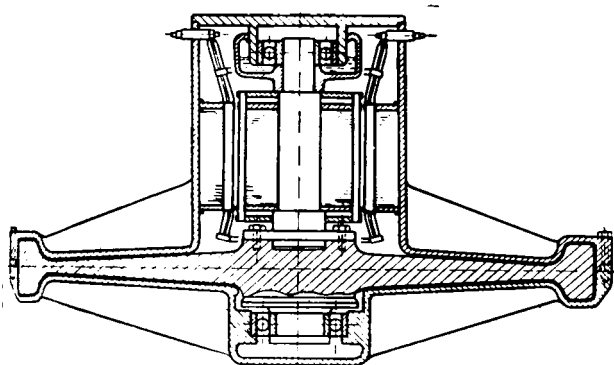


Рис. 1. Поперечный разрез через электродвигатель и маховик.

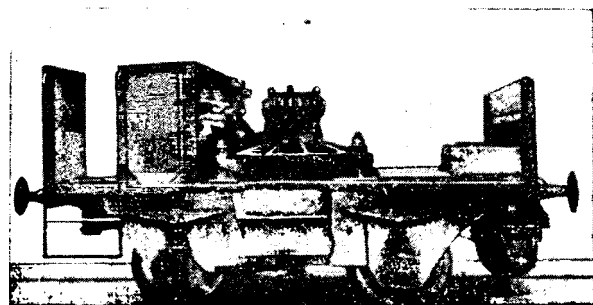


Рис. 2. Экспериментальная платформа с электрожиро-установкой.

ных механизмах приходится считаться с верхним пределом тягового усилия, а в системах с контактной сетью существует нижний предел тягового усилия, диктуемый экономическими соображениями. В этих предельных случаях приходится обычно обращаться к дизель-моторам или двигателям внутреннего сгорания, как к двигательной силе для транспортных механизмов.

Опыт показывает, что тот запас кинетической энергии, который накапливается в маховике, можно использовать в форме электрической энергии.

В герметическом резервуаре, заполненном водородом, помещается тяжелый маховик из хромоникелевой стали, установленный на вертикальном валу на шариковых подшипниках. Этот маховик соединен с трехфазным асинхронным двигателем, вращающимся также в атмосфере водорода.

В период зарядки двигатель включается на сеть трехфазного тока, и маховик разгоняется до скорости около 3000 об/мин. Электродвигатель, вспомогательная аппаратура и вся электрическая схема управления рассчитаны так, что весь процесс зарядки происходит при токе постоянной величины и при $\cos \varphi = 0,8$. Время, потребное для того, чтобы неподвижный маховик довести до полной скорости, составляет около 1 мин. Поскольку маховик и электродвигатель целиком помещены внутри герметического газонепроницаемого кожуха, сальники или газонепроницаемые втулки для прохождения вала не требуются. Втулки устроены только для ввода проводов, питающих электродвигатель.

Замена воздуха водородом играет двоякую роль: уменьшаются потери на трение и улучшается охлаждение обмоток двигателя.

Об уменьшении трения в водороде можно судить по тому, что время выбега маховика от скорости 3000 об/мин до неподвижного состояния составляет от 10 до 15 h (если транспортный механизм, на котором помещен маховик, все время находится в неподвижном состоянии).

Когда требуется возвращать энергию, накопленную маховиком, электродвигателю дается возбуждение, и он превращается в асинхронный генератор с конденсаторным возбуждением, вращаемый маховиком, как механическим

двигателем. Генератор при этом дает трехфазный ток тяговым электродвигателям. Последние представляют собой короткозамкнутые асинхронные двигатели с переключением полюсов и позволяют осуществлять регулирование скорости в отношении 1 : 5 с весьма малыми потерями. Выполненная опытная конструкция такой «электро-жиро»-установки дала к. п. д. около 60%, что превосходит эксплуатационный к. п. д. хорошей аккумуляторной батареи. Можно ожидать, что дальнейшее усовершенствование такого устройства позволит поднять его к. п. д. до 70%.

Главное преимущество описываемого устройства по сравнению с аккумуляторной батареей — очень короткое время зарядки, что позволяет быстрое повторение ее. Аккумуляторная батарея была бы в 30 раз тяжелее; кроме того, батарея требует замены после 300 зарядок, тогда как гарантийный срок для шариковых подшипников не менее трех лет. Наконец, зарядка устройства может производиться непосредственно от сети трехфазного тока, тогда как для аккумуляторной батареи требуется еще выпрямительная установка.

В конструкции, представленной на рис. 2, использовано существующее шасси в виде двухосной платформы на рельсах. На этой конструкции были проверены основные принципы, положенные в основу тягового механизма с электромеханическим аккумулятором в качестве двигателя.

Устройство может работать и от контактной сети (или третьего рельса), питаемой однофазным током 50 Hz.

Работа опытного механизма подтвердила правильность теоретических расчетов. Транспортная установка с прицепным вагоном могла покрывать расстояние в 10—15 км без дополнительной подзарядки. Вес конструкции составляет около 15 t, из которых на вес самого электромеханического аккумулятора приходится около 1,5 t.

Область использования нового вида электротранспорта ограничивается, главным образом, железными дорогами без больших уклонов и не слишком большими и равномерными расстояниями между станциями. Устройство может быть также применено для откатки угля в подземных шахтах (преимущество по сравнению с искрящими троллейными электровозами — взрывобезопасность), для городского транспорта (трамвай, автобус) и пр.

Кандидат техн. наук Л. Б. ГЕЙЛЕР

L. D. Ryder, W. B. Boast. Новая конструкция расчетного стола переменного тока. *El. Eng.*, № 10, стр. 674-679, 1946.

Расчетные столы переменного тока (называемые также анализаторами сетей и моделями электрических сетей) получили за последнее время широкое распространение для расчета и анализа электрических систем. Большинство расчетных столов предназначено для работы при частоте питающего тока в несколько сот герц (обычно 400—500 Hz).

Авторы реферируемой статьи поставили своей целью повышение рабочей частоты стола до такого предела, чтобы можно было использовать аппаратуру, разработанную для нужд радиотехники и прикладной электроники и изготовляемую промышленностью в массовом порядке. Переход к высокой частоте позволяет избавиться от ферромагнитных сердечников в индуктивных катушках, и кроме того, источники высокой частоты могут быть изготовлены с характеристиками лучшими, чем у источников частоты 400—500 Hz.

На рис. 1 изображен график зависимости каталожной стоимости 100-омного емкостного сопротивления от частоты, характеризующий аналогичную зависимость и для индуктивных сопротивлений. Исходя из графика рис. 1, для стола была выбрана рабочая частота в 10 000 Hz. Эта частота достаточно высока, чтобы можно было применить катушки без ферромагнитных сердечников и дешевые радиодетали, и не настолько велика, чтобы паразитные емкости и индуктивности соединительных проводов создавали чрезмерные затруднения при построении стола. Питание всего стола производится от генератора стандартной частоты 100 000 Hz через ламповые преобразователи частоты. Генератор снабжен кварцевым стабилизатором.

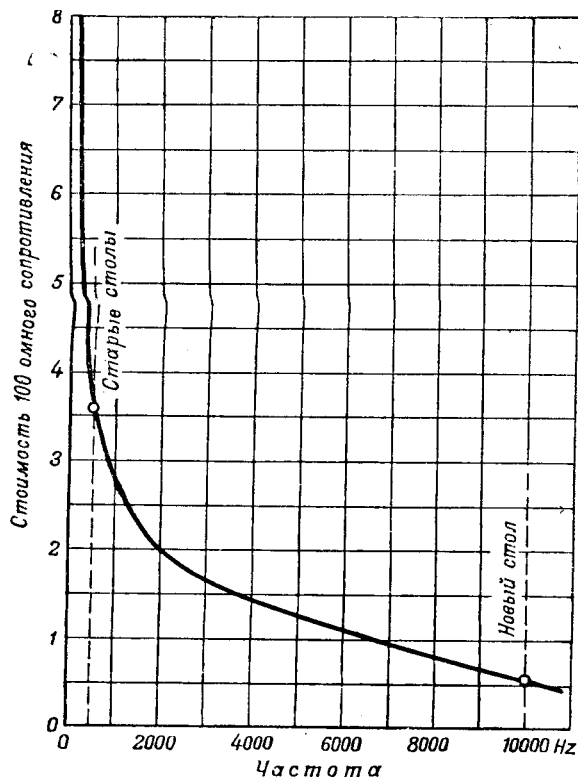


Рис. 1.

Кроме того, производится периодическая проверка частоты по радиосигналам службы времени. Таким путем удается поддерживать заданное значение частоты с точностью до 1 Гц. Напряжение частоты 100 000 Гц преобразуется в напряжение частоты 10 000 Гц, фильтруется и подается на входы усилителей, играющих роль источников в схемах, набираемых на столе.

Выбор величины номинального напряжения и тока определяется габаритными размерами элементов, электрическими и магнитными паразитными связями между ними, а также сопротивлениями и утечками соединительных проводов. Были выбраны: номинальное напряжение в 10 В; номинальный ток в 0,1 А; номинальное сопротивление в 100 Ом.

В качестве соединительных проводов был выбран двухжильный коаксиальный кабель с экранирующей оболочкой. Диаметр кабеля 9,5 мм. Емкость между жилами кабеля, шунтирующая тот элемент стола, к которому подключен кабель, вносит погрешность в 0,25% от номинального значения. Емкость двух жил по отношению к экрану и земле ничтожно мала (для самого длинного кабеля емкостной ток равен ~ 0,075% от номинального тока). Сопротивление самого длинного кабеля составляет около 0,1% от номинальной величины. Реактивное сопротивление самого длинного соединительного кабеля оказалось равным также 0,1%. Соединение элементов в схему осуществляется на коммутационном поле, куда сходятся все соединительные кабели.

Индуктивные катушки изготовлены без ферромагнитных сердечников и снабжены экранами. Для большинства катушек угол сдвига фаз между приложенным напряжением и током больше чем 88° (тангенс угла потерь меньше 3,5%), а для некоторых, наиболее употребительных катушек больше чем 89° (соответственно, тангенс угла потерь меньше 1,8%).

Элементы стола смонтированы на стандартных радиопанелях, установленных на каркасах. Все управление столом и главные измерительные приборы расположены на пульте управления. Предусмотрена возможность измерения напряжения, тока, активной и реактивной мощности, а также сдвига фаз. Все приборы, кроме электродинамического ваттметра, — ламповые. Подключение измерительных приборов к любой точке схемы производится с помощью

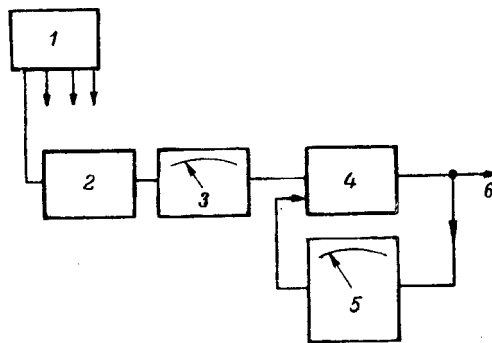


Рис. 2.

реле, управляемых системой кнопок, расположенных на пульте. Кнопки снабжены механической блокировкой. Пределы измерения главных измерительных приборов переключаются на пульте. Выбор предела фиксируется цветной сигнальной лампой.

Построенный стол содержит: 4 генераторные единицы, 24 линейных элемента, 12 нагрузочных элементов, 12 емкостных элементов, 4 автотрансформатора и 4 трансформатора с коэффициентом трансформации 1 : 1.

На рис. 2 показана скелетная схема генераторной единицы. Регулировки фазы и величины напряжения на выходе выполняются отдельно. Установленная величина напряжения автоматически поддерживается почти неизменной при нагрузке генераторной единицы до 250% от номинального тока.

Линейные элементы осуществлены по Л-образной схеме. Каждый элемент состоит из двух переменных емкостей, переменной индуктивности и переменного сопротивления. Активное и индуктивное сопротивления изменяются через 1%, до 99% номинальной величины, емкостная проводимость — через 0,1%, до 9,9%.

Нагрузочные элементы состоят из активного и индуктивного сопротивлений, включаемых параллельно или последовательно. Регулировка — до 9990% ступенями в 10%. Нагрузочные элементы включаются через встроенные в них автотрансформаторы с переменным коэффициентом трансформации 0,9—1,1, через 0,01.

Емкостные элементы предназначаются для увеличения емкостей линейных элементов, для имитации емкости нагрузок и т. п. Емкость изменяется ступенями в 1% до 99%.

Автотрансформаторы используются в тех случаях, когда результирующий коэффициент трансформации в замкнутом кольце не равен единице. Коэффициент трансформации автотрансформатора изменяется от 1 до 1,295, через 0,005. Эквивалентное параллельное сопротивление автотрансформатора (в его схеме замещения) не превышает 0,7%.

Трансформаторы 1 : 1 служат для имитации взаимной индукции между линиями электроэнергетической системы. Опытный расчетный стол на частоте 10 000 Гц обходился в два раза дешевле обычного стола на частоте 400—500 Гц.

Примечание референта. При большом числе элементов (измеряемом сотнями) и универсальном назначении стола применение частоты 10 000 Гц должно представлять значительные трудности. Новый расчетный стол не имеет каких-либо особых, связанных с применением более высокой частоты технических или эксплуатационных достоинств, за исключением независимости индуктивности катушек от тока. Для катушек с ферромагнитными сердечниками, установленными в столах с рабочей частотой 400—500 Гц, эта зависимость составляет 2—4% во всем диапазоне изменения тока. Целесообразность применения частоты свыше 400—500 Гц для стола универсального назначения еще не доказана. Дальнейшее исследование в этом направлении представляет интерес.

Кандидат техн. наук М. С. ЛИБКИН

R. W. Guelke, C. A. Schoute-Vanneck. Индукционный метод измерения скорости морских течений. JFE, ч. II, т. 94, № 37, стр. 71, 1941.

Погрузив в проводящую жидкость, находящуюся в магнитном поле, два неподвижных электрода, можно получить своеобразную униполярную электрическую машину, э. д. с. которой пропорциональна скорости движения жидкости относительно электродов в направлении, перпендикулярном линии, соединяющей электроды, и направлению магнитного поля. Первые опыты использования этого явления для измерения скорости приливных и других течений воды в море производились просто с двумя электродами, разнесенными на расстояние порядка 1 км (или даже многих километров) друг от друга. В качестве магнитного поля, движение воды в котором создавало э. д. с., использовалось магнитное поле земли. Влияние паразитных э. д. с., обусловленных электрохимическими явлениями у электродов, при этих измерениях было ослаблено путем применения серебряных электродов, покрытых слоем хлористого серебра, и увеличения индуктируемой э. д. с., посредством разнесения электродов на возможно большее расстояние. Очевидно, что таким способом можно было измерить только среднюю скорость течения на участке между электродами.

Для измерения скорости течения в определенном месте был построен основанный на том же принципе прибор, в котором расстояние между электродами было сокращено до 0,35 м. Для получения удовлетворительной чувствительности и устранения помех от э. д. с. гальванического характера магнитное поле земли было заменено вертикальным переменным полем с индукцией порядка 15 Gs. Применение переменного магнитного поля позволило упростить задачу усиления получаемой незначительной

э. д. с. (около 0,53 mV при скорости в 1 m/sec) и полностью избавиться от влияния э. д. с. электрохимического происхождения. Однако, при этом возникла задача борьбы с помехами, создаваемыми э. д. с., наводимой переменным магнитным полем в измерительном контуре при неподвижной воде (э. д. с. трансформации). Для устранения этой помехи было прежде всего применено такое взаимное расположение катушки, создающей поле, измерительных электродов и подводимых к ним с берега соединительных проводников, при котором взаимная индукция между ними была бы возможно малой. Таким образом, э. д. с. трансформации в цепи электродов была сведена примерно до 4 mV. Для компенсации этой э. д. с. цепь катушки, создающей магнитное поле, и цепь электродов связывались с помощью катушек переменной взаимной индуктивности, регулировкой которых удавалось свести паразитную э. д. с. в цепи электродов до значений около 50 μ V. Существование этой, не поддающейся компенсации э. д. с. автор реферируемой статьи объясняет сдвигом фаз между магнитным полем и создающим это поле током, обусловленным вихревыми токами в воде. В качестве возможной меры компенсации этой остаточной э. д. с. авторы указывают внесение в поле катушек взаимной индуктивности металлической пластинки. Очевидно, что с наименьшим успехом можно было бы применить шунтирование катушек регулируемыми сопротивлениями.

Помимо компенсации э. д. с. трансформации в цепи электродов для устранения их влияния на показания прибора в усилителе применено фазочувствительное детектирование.

Испытание прибора в экспериментальном канале показало возможность измерения скорости течения с точностью $\pm 10\%$.

Кандидат техн. наук Б. И. ФИЛИПОВИЧ



От редакции

В связи с поступившими откликами по поводу статьи «Развитие электротехники в Советском Союзе за 30 лет» (№ 11, 1947) редакция считает необходимым сообщить следующее. Указанная статья, как и отмечалось в аннотации к ней, являлась сжатым обзором основных итогов электротехники в СССР и связанных с этой областью техники важнейших работ и достижений советских ученых и инженеров. В кратком обзоре не представлялось возможным охватить и даже перечислить с необходимой полнотой многообразные работы и достижения, характеризующие мощный рост электротехники и электрификации СССР. Вследствие этого не удалось отметить некоторые важные работы и упомянуть ряд организаций и отдельных лиц, внесших свой ценный вклад в развитие отечественной электротехники. Редакция ставит своей задачей систематически освещать все наиболее значительные работы и достижения советских ученых и инженеров-электриков в регулярно публикуемых материалах.



Научно-техническая сессия по экономии электроэнергии в промышленных предприятиях

Московским отделением Научного инженерно-технического общества энергетики (МОНИТОЭ) совместно с Энергосбытом Мосэнерго была проведена в октябре 1947 г. в Москве научно-техническая сессия по экономии электроэнергии в промышленных предприятиях. В работе сессии приняли участие свыше 150 представителей фабрик и заводов, научно-исследовательских институтов, высших технических учебных заведений Москвы и Московской области.

На сессии были заслушаны 24 доклада теоретического и практического характера, а также 4 сообщения московских заводов о проводимых мероприятиях по экономии электроэнергии на различных энергетических участках этих заводов.

Представитель Энергосбыта Мосэнерго инж. Э. С. Иохвидов подчеркнул важнейшее государственное значение экономии электроэнергии. Государственной инспекцией по промэнергетике и энергонадзору при Министерстве электростанций СССР осуществляется контроль за рациональным расходованием электроэнергии путем установления во всех отраслях промышленности удельных норм расхода электроэнергии. На Инспекцию возложена также задача по собиранию, широкой популяризации и внедрению в промышленность опыта передовых предприятий по экономии электроэнергии.

В результате проводившейся борьбы за строжайшую экономию электроэнергии во всех отраслях народного хозяйства, в течение 1945—1947 гг. по предприятиям, присоединенным к сетям Мосэнерго, было сэкономлено 345 млн. kWh. Наибольший процент экономии электроэнергии дали мероприятия по рационализации технологических процессов (54%), в том числе рационализация обработки металла—9%, улучшение режима работы энергоемких агрегатов—20%, уменьшение потерь воды и сжатого воздуха—10%, упорядочение энергохозяйства предприятий—15%.

На примере передовых предприятий видно, что лучшие достижения по экономии электроэнергии получаются там, где в результате слаженной работы энергетиков и технологов систематически проводится рационализация технологического процесса производства.

Проф. П. Г. Грудинский изложил методы определения экономических режимов работы трансформаторов и асинхронных двигателей. Был освещен вопрос об экономическом эквиваленте реактивной энергии и его распространении на асинхронные двигатели. Были определены общие формулы для определения экономических режимов многотрансформаторных подстанций с трансформаторами различной мощности, а также методы определения экономической мощности для данной установки в зависимости от графика нагрузки и типа трансформатора. Докладчиком приведены кривые, показывающие зависимость наименьшей нагрузки трансформатора в максимум от величины экономического эквивалента для трех типичных графиков нагрузки. Анализ этих кривых приводит к выводу, что для трансформаторов 6, 10 и 35 kV нагрузка в максимум должна быть тем выше, чем дальше трансформаторы установлены от места генерации реактивной энергии и чем хуже они используются. Автором даны формулы для проверки целесообразности замены трансформатора одной мощности трансформатором другой мощности в целях уменьшения потерь энергии. Анализ экономического режима асинхронных двигателей приводит к выводу, что для двигателей, расположенных близко к источникам энергии, оптимальный режим имеет место при недогрузке двигате-

лей. Для двигателей, удаленных от источников энергии, экономический режим достигается при значительной перегрузке в периоды максимальных нагрузок, что решается с учетом технологических требований к приводу. Был также затронут вопрос о влиянии коэффициента мощности в электрической системе на экономичный режим и на требования эксплуатации к электромашиностроительным заводам, а также показаны экономические результаты применения машин и аппаратов для выработки реактивной энергии на месте ее потребления.

Кандидат техн. наук А. Я. Лернер сделал доклад на тему «Экономичные методы регулирования скорости вращения электроприводов». Все регулируемые электроприводы с точки зрения расхода электроэнергии и экономичности могут быть разделены на два класса: 1) приводы, в которых регулирование скорости осуществляется путем изменения количества энергии, отдаваемой на вал рабочей машины, 2) приводы, в которых регулирование скорости осуществляется путем изменения количества энергии, потребляемой из сети. При первом методе уменьшение скорости вращения достигается за счет увеличения потерь. При втором методе регулирования скорости потери не изменяются, вследствие чего этот метод более экономичен. Особенно были отмечены вопросы регулирования скорости по системе Леонарда, вопросы применения многоскоростных двигателей и преимущества двигателей типа Шраге и ионных аппаратов.

Инж. Б. Б. Лурье в докладе «Экономия электроэнергии в подъемно-транспортных механизмах» рассмотрел работу различных типов электродвигателей в применении к подъемно-транспортным механизмам. Докладчиком была подчеркнута возможность рекуперации энергии при генераторном моменте на валу асинхронного двигателя, что дает до 30—34% экономии электроэнергии. Были отмечены преимущества схемы Леонарда для крановых установок при работе с частым регулированием и пусками, а также значение правильной работы оператора на механизме для экономии электроэнергии.

Инж. А. А. Тайц в докладе «Улучшение коэффициента мощности промышленных предприятий» обрисовал основные причины низкого коэффициента мощности фабрично-заводских установок и вредные последствия этого. Основными мероприятиями по улучшению коэффициента мощности являются сокращение потребления реактивной мощности приемниками электроэнергии, применение синхронных двигателей и, в последнюю очередь, в случае нецелесообразности или затруднительности их установки, применение статических конденсаторов. Установка статических конденсаторов быстро окупается тем, что каждые 5—7 kVA мощности конденсаторов освобождают 1 kW установленной мощности на станциях, по стоимости в полтора—два раза превосходящей стоимость установки конденсаторов. В системе с максимумом нагрузки в 850 000 kW при улучшении коэффициента мощности с 0,8 до 0,95, пик нагрузки снижается на 40 000 kW, а потери энергии уменьшаются на 20%. В докладе были отмечены новый тип конденсаторов «Пластикон» с диэлектриком из синтетической пленки и пропиткой из силикона, а также самовосстанавливающиеся после пробоя конденсаторы «Солитэ» из бумаги, металлизированной цинком или алюминием.

В докладе «Методы нормирования удельных расходов электроэнергии» инж. А. А. Тайц осветил существующие методы определения удельных расходов электроэнергии, отметил значение наличия

опытных кривых, характеризующих динамику удельной полезной работы и энергетических характеристик агрегатов и указал на необходимость учета влияния реактивной мощности при выборе экономичных режимов (применяя экономический эквивалент).

Особенное внимание должно быть уделено составлению и анализу энергетических балансов и выбору наиболее рациональных режимов работы оборудования. Для улучшения постановки нормирования удельных расходов необходимы обобщение значительного опыта, накопленного в промышленности, разработка руководящих указаний по нормированию удельных расходов электроэнергии в наиболее энергоемких производствах.

Кандидат техн. наук Г. А. Ривкин в докладе на тему «Современные ртутно-преобразовательные установки» сделал обзор развития металлических ртутных выпрямителей, отметил области применения их, а также преимущества и особенности многофазных одноанодных выпрямителей и различных систем зажигания пилитронное, струйно-ртутное). Освоение сеточного регулирования позволило еще более, чем раньше, применять ртутные выпрямители в области электролиза. Сеточное регулирование напряжения и возможность инвертирования тока открывают широкие перспективы применения ртутных выпрямителей для питания регулируемого электропривода. Регулируемый выпрямитель в состоянии успешно заменить вращающиеся преобразователи, работающие по схеме Леонарда, и дает возможность осуществить безректатный пуск электродвигателей, широкое и плавное регулирование числа оборотов, поддержание постоянства числа оборотов, реверсирование хода электродвигателей, электрическое рекуперативное торможение и т. п. Средний коэффициент полезного действия электропривода одного реверсивного прокатного стана при питании от выпрямителя доходил до 75%, а при вращающихся преобразователях составлял 60%.

Докладчик остановился на задачах, связанных с уменьшением влияния искажения первичного тока и с защитой от обратных зажигания. Наиболее совершенным способом защиты от обратных зажигания, в особенности одноанодных выпрямителей, является применение анодных однополюсных автоматов обратного действия в каждом из анодов.

Инж. С. М. Лившиц в докладе «Специфика борьбы с потерями энергии в элементах электроснабжения промышленных предприятий» охарактеризовал специфические особенности расчета экономических сечений проводов в электросетях промышленных предприятий и обратил внимание на необходимость установления коэффициентов спроса. Освещены вопросы расчета сетей для перемещающейся нагрузки, а также даны соображения по улучшению коэффициента мощности в промышленных сетях, по применению разукрупненных подстанций и магистральных систем питания.

Доктор техн. наук, проф. Д. П. Морозов в своем докладе разобрал существующие схемы электромашиной автоматики и новую схему электропривода для регулируемых механизмов малой мощности быстрого переменного режима. Схема автора характерна тем, что в системе Леонарда обмотка возбуждения генератора включается встречно с его э. д. с. В системе используются электрические машины нормального исполнения. Система практически обладает весьма малой инерционностью переходного процесса возбуждения. Необходимая величина электромагнитной инерции легко может быть установлена соответствующим выбором параметров, а в первую очередь соотношением напряжений якоря генератора и его обмотки возбуждения. Мощность, потребляемая от возбудителя, невелика.

Область применения описанной схемы может быть расширена, так как схема обеспечивает получение малой (ползучей) скорости двигателя на пологой механической характеристике. Испытания, проведенные в условиях лаборатории, показали, что в данной схеме возможно получить 0,5% от номинальной скорости на пологой механической характеристике. В данной системе могут быть применены все методы и средства для форсирования и регулирования переходных процессов, как и в обычных схемах контакторно-релейной или электромашиной автоматики.

Кандидат техн. наук М. С. Рябов в докладе о новых источниках света и экономии электроэнергии в осветительных установках указал на преимущества люминесцентных ламп, обладающих экономичностью в 2,5—3,5 раза большей, чем лампы накаливания. Люминесцентные лампы «дневного» света рекомендуется применять в тех помещениях, где по производственным условиям требуется точно различать цвета и их оттенки. Во всех остальных помещениях, где к качеству цветопередачи не предъявляется особых требований, следует применять наиболее экономичные лампы белого света. Наилучшая светоотдача люминесцентных ламп имеет место при температуре воздуха, окружающего лампу, в пределах 21—27° С, ввиду чего эти лампы рекомендуется применять в нормально отапливаемых помещениях, в помещениях же с температурой ниже 5° С применение люминесцентных ламп, как правило, не рекомендуется. Были описаны основные мероприятия по экономии электроэнергии в осветительных установках.

Кандидат техн. наук А. С. Сандлер в докладе «Регулирование скорости электроприводов металлорежущих станков» привел основные показатели, характеризующие регулирование скорости электроприводов, потери энергии в электроприводе при регулировании скорости и способы регулирования скорости станков. Применение многоскоростных двигателей в сочетании с механическим ступенчатым регулированием позволяет повысить плавность регулирования и увеличить диапазон регулирования. Такой электрический привод может быть применен для станков, не требующих точного регулирования скорости (обычные универсальные токарные станки, радиально-сверлильные и т. д.). Были отмечены также современные способы бесступенчатого регулирования скорости электроприводов постоянного тока и указаны способы для расширения диапазона регулирования обычной системы Леонарда. Из новых схем, нашедших практическое применение в приводе станков, были отмечены: привод с серийным двигателем, питаемым от серийного генератора, привод по системе Леонарда с регулятором напряжения (типа рототрол) и привод постоянного тока с ионными преобразователями.

Первый тип привода может быть использован для механизмов подачи (например, в шлифовальных, фрезерных станках и т. д.), где требуемая мощность не превосходит 8—10 kW. Второй тип—привод по системе Леонарда с вращающимся регулятором напряжения обладает высокими качествами с точки зрения регулирования скорости, а также способностью форсирования процессов пуска и торможения. Этот привод может найти применение для строгальных, продольнофрезерных и разного рода прецизионных станков, у которых при регулировании скорости момент нагрузки остается постоянным. Третий тип—привод постоянного тока, в котором в качестве преобразователя используются ионные приборы (тиратроны), нашел применение для металлорежущих станков малой мощности (шлифовальные станки, автоматы, полировальные станки). Ионный привод является более сложным в сравнении с системой Леонарда с регулятором напряжения и более дорогим, но к его достоинствам следует отнести отсутствие вращающихся машин в преобразовательном агрегате. Докладчиком была отмечена большая работа, проведенная Экспериментальным научно-исследовательским институтом металлорежущих станков по созданию отечественного привода с тиатронными преобразователями и электронным управлением.

Инж. М. И. Трехов доложил о достигнутой экономии электроэнергии в металлообрабатывающих и литейных цехах Московского автозавода им. Сталина за счет уменьшения припусков, литников, прибылей, сокращения брака, литья в кокиль, применения армирования опок и пр. В механических цехах электроэнергия экономилась благодаря применению многорезцововой обработки, совмещению операций, применению многоместных приспособлений, уменьшению потерь на холостые ходы производственного оборудования. Особенно эффективным оказалось внедрение малой автоматизации, автоматизации работы спаренных агрегатов, применение сигнализации, предупреждающей перегрузку агрегатов, применение высокой частоты для местных нагревов и поверхностной закалки.

Инж. Б. А. Левитанский в докладе «Экономия и нормирование потребления электро-

энергии в прокатном производстве» отметил влияние температуры, числа пропусков и распределения обжаты на расход энергии при прокате. Снижение температуры металла на 60°C при прокатке на одном из полунепрерывных станов вызвало увеличение нагрузки асинхронного двигателя агрегата Леонарда с 5 000 до 6 600 kW и расхода энергии, примерно, на 40%. Переход с 17 на 13 пропусков на одном заготовочном стане позволил снизить расход энергии на 20%. Замена бронзовых подшипников текстолитовыми позволила снизить расход энергии на одном из станов с 46 до 36 kWh/t. Для снижения потерь на трение рекомендовано применение подшипников из древлпластмасс и подшипников жидкого трения Моргойл. Отмечены мероприятия по улучшению электрического режима путем равномерной нагрузки главных двигателей, сокращения времени работы мощных преобразователей на холостом ходу, установления минимального сопротивления жидкостных реостатов при повышенной уставке регуляторов и т. д. Более широкое внедрение переменного тока вместо постоянного для питания двигателей механизмов и металлургических агрегатов и кранов также даст значительный технико-экономический эффект.

Применение управляемых ртутных выпрямителей вместо вращающихся преобразователей для питания прокатных двигателей нерверсивных регулируемых станов имеет, как указывает докладчик, большое значение для рационализации электропривода и экономии электроэнергии. При прокате заготовок 50×50 mm из слитков размером 160×180 mm и весом 3 t на заготовочном стане 500 mm производительностью 90 t/h удельные расходы составляли при управляемом ртутном выпрямителе—23,3 kW/t и при питании двигателей от агрегата Леонарда—25,7 kWh/t.

Инж. С. А. Филиппов в докладе «Экономия электроэнергии в литейном производстве» осветил опыт работы завода им. Кагановича.

Доктор техн. наук, проф. П. И. Рубцов в своем докладе осветил: значение прецизионного литья для получения отливок без механической обработки.

Проф. Л. И. Аронов в докладе «Экономия электроэнергии в дуговых электросталеплавильных печах» отметил основные факторы, определяющие удельный расход электроэнергии в дуговых электропечах, а именно, конструкцию и электрический режим работы установки, технологический процесс выплавки стали и организацию производства.

Докладчик рекомендовал переход на производство электростали методом переплава легированных отходов, что может дать 10—15% экономии в удельном расходе энергии.

Кандидат техн. наук Ю. Е. Ефроймович в докладе «Автоматическое регулирование электросталеплавильных дуговых печей» отметил результаты испытания и наладки различных систем автоматического регулирования дуговых печей. Испытанию подверглись регуляторы с электромеханическим усилителем типа «рототрол» и «регулекс». Обе системы компактны и надежны в работе; однако первый тип характеризуется низкой степенью устойчивости, второй тип—низкой чувствительностью и малой быстродейственностью. Новые регуляторы обеспечили сокращение длительности плавки на 5—9%, снижение расхода электроэнергии на 2—7%. В СССР разработаны новые автоматические регуляторы, с помощью которых возможна модернизация устаревших релейноконтакторных регуляторов. Главные особенности их—двухскоростное регулирование, наличие обратной скорости связи, программное изменение жесткости обратной связи в течение одного цикла плавки.

Кандидат техн. наук А. Д. Свенчанский в докладе «Экономия электроэнергии в электрических термических печах» указал на основные мероприятия по снижению удельных расходов энергии, а именно, повышение производительности печей, уменьшение тепловых потерь печей, изменение температурного режима, использование тепла нагретых деталей, введение более совершенных процессов. Докладчиком приведены данные о достигнутой максимальной производительности на 1 m^2 площади среднетемпературных печей (температура нагрева

$700\text{—}900^{\circ}\text{C}$): для стали и латуни 300 kg/m²h, для меди 350 kg/m²h, для алюминия 100 kg/m²h.

Из новых, более совершенных, методов термообработки докладчиком указан скоростной индукционный нагрев, применение соляных и селитровых ванн с искусственной циркуляцией, вызванной электромагнитным устройством, внедрение контактного (прямого) нагрева, при котором изделие непосредственно включается в питающую цепь низкого напряжения и нагревается выделяющимся в нем самом джоулевым теплом.

Кандидат техн. наук А. Я. Лернер в докладе «Автоматическое регулирование температуры в электрических печах» остановился на вопросах развития техники автоматического регулирования температуры в электрических печах, методах регулирования температуры, приборах для регулирования температуры электрических печей, схемах регулирования температуры, перспективах развития систем автоматического регулирования электрических печей.

Кандидат техн. наук Н. Л. Каганов в докладе «Пути экономии электроэнергии при электросварочных работах» указал на возможность снижения расхода энергии на дуговую сварку за счет уменьшения количества наплавляемого металла, увеличения коэффициента расплавления электродов, сокращения угара, увеличения применяемых сил тока, уменьшения падения напряжения на дуге. Наиболее сильное влияние на расход электроэнергии оказывает время протекания тока и, связанная с ним сила тока при выполнении одной сварки.

Инж. В. П. Либер в докладе на тему «Экономия электроэнергии в гальванических цехах» отметил основные мероприятия по экономии электроэнергии—рациональный выбор мотор-генераторов, группировка токоприемников, использование последовательного соединения ванн, борьба с потерями в контактных соединениях.

Инж. Ф. В. Чумаков в докладе на тему «Экономия электроэнергии в насосных установках» осветил опыт работы по экономии электроэнергии Сталинской насосной станции.

Инж. С. А. Каюков в докладе на тему «Экономия электроэнергии в воздушном компрессорных установках» сообщил об опыте работы по экономии электроэнергии на 1 Государственном подшипниковом заводе им. Кагановича.

Доктор техн. наук К. И. Бабат в докладе на тему «Высокочастотная закалка» привел стандартную схему установки высокочастотного нагрева, наметил пути улучшения эксплуатации этих установок и охарактеризовал значение конденсаторов для установки высокой частоты и преимущества применения высокочастотного нагрева. Основными методами улучшения эксплуатации высокочастотных установок является применение многократной и последовательной закалки. Основное внимание необходимо обращать на конструкцию нагревательного индуктора. Необходим выпуск мелких установок мощностью 2—3 kW для закалки мелких деталей. Необходим также выпуск керамических конденсаторов большой мощности, а также пневматических конденсаторов, в которых комплект металлических пластин помещен в герметическом баке, заполненном газом под давлением. Особо отмечено применение высокочастотного нагрева неметаллических изделий.

Инж. К. З. Шепеляковский в своем докладе осветил опыт работы высокочастотных установок на автозаводе им. Сталина и сообщил о ряде мероприятий по улучшению эксплуатации установок.

Проф. М. В. Сторожев сделал доклад на тему «Экономия электроэнергии в кузнечно-штамповочных цехах».

Инж. Г. Ф. Никулин в своем докладе осветил опыт работы по экономии электроэнергии в прокатных цехах завода «Серп и Молот».

Инж. Г. Б. Овечкин осветил опыт работы по экономии электроэнергии в механических цехах.

В результате обсуждения состоявшихся докладов научно-техническая сессия приняла развернутое решение.

Инж. А. А. ТАЙЦ и А. С. АЛЕКСАНДРОВ
Секция промэлектротехники МОНИТОЗ



Академик В. С. Кулебакин

К 30-ЛЕТИЮ НАУЧНОЙ И ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В январе 1948 г. исполнилось 30-летие научной и педагогической деятельности выдающегося советского ученого в области электротехники академика Виктора Сергеевича Кулебакина.

В 1918 г. В. С. Кулебакин начал педагогическую работу в Московском высшем техническом училище в качестве руководителя практических занятий в электротехнической лаборатории. Спустя три года он был избран по конкурсу профессором Механико-электротехнического института им. Ломоносова, а в 1922 г. — профессором Московского высшего технического училища. После преобразования МВТУ В. С. Кулебакин избирается заведующим организованными им кафедрой и лабораторией электроаппаратостроения в Московском энергетическом институте и в 1923 г. начинает свою деятельность в Военной воздушной академии Красной Армии профессором, а затем начальником кафедры авиационной электротехники. И в Московском энергетическом институте и в Воздушной академии В. С. Кулебакин выполнил огромную работу по созданию новых учебных дисциплин, по воспитанию преподавательских кадров и по оборудованию ряда лабораторий.

Научно-исследовательская деятельность В. С. Кулебакина протекала главным образом в области электрических машин и аппаратов и авиационной электротехники. Значительное внимание было уделено им также вопросам автоматического регулирования.

В области электрических машин В. С. Кулебакин предложил ряд методов по расчету и исследованию рабочего процесса синхронных машин, трансформаторов, возбуждателей к синхронным машинам и по расчету машин постоянного тока.

Оригинальное решение им было дано для определения основных параметров скоростных возбуждателей и низковольтных машин постоянного тока. Работы В. С. Кулебакина по расчету скоростных возбуждателей прикрепились в настоящее время не только к теоретическому, но и к большому практическому значению в связи с разрешением проблемы возбуждения мощных генераторов.

Теоретические и экспериментальные исследования В. С. Кулебакина в области переходных магнитных процессов синхронных машин, по кинетике и устойчивости возбуждения электрических машин подробно освещают наиболее существенные вопросы, связанные с проблемой автоматического регулирования и поддержания устойчивости синхронных систем. Эти работы по кинетике возбуждения являются не только оригинальными, но и пионерскими. Большое количество работ касается методов испытаний и исследований электрических машин. В этой области им предложен ряд новых и оригинальных способов и приборов по определению ударных токов короткого замыкания, фазового смещения напряжений, по испытанию щеток, по измерению внутреннего угла сдвига фаз в синхронных машинах и т. д. Капитальный труд В. С. Кулебакина «Испытание электрических машин», вышедший в двух изданиях, характеризует широкую эрудицию автора в этой области. Эта книга служит пособием для широкого круга электротехников.

В. С. Кулебакиным проведены теоретические и экспериментальные исследования по асинхронным двигателям, работающим с применением конденсаторов в первичной и вторичной цепи. В результате этих исследований открываются перспективы использования асинхронных машин в электрической тяге. Идея использования конденсаторных двигателей для электрической тяги реализована в Московском энергетическом институте им. Молотова. В настоящее время строятся электропоезда промышленного типа для угольной промышленности.

Работы В. С. Кулебакина по электрическим аппаратам затрагивают самые разнообразные вопросы, связанные с теорией, расчетом и исследованием реостатов, реле, выключателей и автоматических регуляторов. Здесь особо следует отметить исследования по автоматике регулирования электрических машин, по разработке теории рабочего



процесса и настройки вибрационных регуляторов. В результате исследований создана теория автоматического регулирования и указаны пути дальнейших исследований и разработки методов расчета автоматической аппаратуры. На основе этих работ удалось успешно разрешить авто-регулирование самолетных и других генераторов.

Монография В. С. Кулебакина «Электрическая аппаратура» заслуженно считается ценным пособием для электротехников. Много труда В. С. Кулебакиным положено на исследование рабочего процесса и разработку теории и расчетов электрических зажигательных систем (магнето, свечей). Работы в этой области в значительной мере способствовали успешному освоению производства этих важных для авиации аппаратов. Попутно был исследован вопрос о мешающем действии электрической зажигательной системы на авиационный радиоприем.

Работы В. С. Кулебакина по электрическому освещению способствовали разрешению проблемы ночных полетов. Теоретическое и экспериментальное исследование отражения света от земных покровов, от вращающихся пропеллеров, оригинальные методы расчета освещения открытых пространств были положены в основу проектирования и создания оборудования аэродромов.

Внимание В. С. Кулебакина за последние годы и особенно в период Великой Отечественной войны было сосредоточено на исследовании отдельных видов авиационного электрооборудования. Ряд работ в этой области имел существенное значение в деле укрепления обороноспособности нашей страны. В. С. Кулебакин с достаточной полнотой дал представление о статических характеристиках и кинетических свойствах амплитудно-генераторов, выявил основные особенности этих машин.

В настоящее время В. С. Кулебакин работает над созданием фундаментального труда по электрооборудованию самолетов, первый том которого уже издан. За время научно-исследовательской и практической деятельности В. С. Кулебакиным опубликовано более 100 книг, монографий и статей. Много десятков книг и статей опубликовано учениками В. С. Кулебакина под его редакцией.

Практическая производственная работа В. С. Кулебакина протекала все годы параллельно с научно-педагогической деятельностью. В. С. Кулебакин не может быть отнесен к типу кабинетных ученых. С 1918 г. по 1922 г. В. С. Кулебакин работал по электрификации Подмосквового каменноугольного бассейна. Одновременно, в 1920—1921 гг. он был консультантом завода «Искромет». В 1926—1930 гг. на заводе «Радио» и на «Электрозаводе» он принимал участие в налаживании производства и в разработке новых типов магнето и других электрических машин специального назначения, а также авиаосечей. С 1936 г. он состоял консультантом Электрокомбината им. Куйбышева.

В. С. Кулебакин принимал деятельное участие в организации Всесоюзного электротехнического института и с 1921 по 1933 гг. занимал там должности научного руководителя и заведующего отделами (измерительным, электрической аппаратуры), главного научного руководителя лаборатории высоких напряжений и заместителя директора. В 1932—1933 гг. он являлся заместителем директора МЭИ по учебно-научной части и председателем учебно-методического совета.

В 1933 г. В. С. Кулебакин был избран членом-корреспондентом Академии наук СССР, и в 1938 г. был утвержден Президиумом Академии наук СССР председателем Комитета (позднее директором института) автоматики и телемеханики. В 1939 г. В. С. Кулебакин избран действительным членом Академии наук СССР.

В 1935 г. В. С. Кулебакин был назначен членом комиссии при СНК СССР по разработке вопроса о переводе электрохозяйства на 100-периодный ток. Этот вопрос был выдвинут В. С. Кулебакиным.

В 1940 г. В. С. Кулебакин был назначен членом Совета научно-технической экспертизы Госплана при СНК СССР и членом Высшей аттестационной комиссии.

Виктор Сергеевич Кулебакин состоял членом редакционной коллегии журнала «Вестник теоретической электротехники», членом редакционного совета журналов «Электричество» и «Энергетик», трудов МЭИ, «Большой технической энциклопедии» и др. научно-технических изданий.

В 1914 — 1918 гг. В. С. Кулебакин находился на военной службе в Воздушном флоте. С 1920 по 1926 г. состоял постоянным членом по электро-радиотехнике в Научном комитете Управления военно-воздушных сил. Научные работы, а также активная практическая и общественная деятельность В. С. Кулебакина широко известна в военно-воздушном флоте. В октябре 1942 г. В. С. Кулебакину присвоено военное звание генерал-майора инженерно-авиационной службы.

С 1944 г. В. С. Кулебакин возглавляет в Московском ордена Ленина энергетическом институте им. Молотова новую созданную им кафедру инженерно-авиационной службы. За короткий срок существования этой кафедры созданы лаборатории и развернута большая научно-исследовательская работа.

Неутомимая энергия В. С. Кулебакина, его большая эрудиция в самых разнообразных вопросах электротехники, богатый опыт, живое и непосредственное участие в решении важнейших задач, стоящих перед промышленностью, и задач по электрификации СССР и усилению обороноспособности страны, активная общественно-политическая работа, — все это ярко характеризует облик Виктора Сергеевича Кулебакина как ученого-патриота, отдающего все свои силы на служение социалистической Родине.

Правительство высоко оценило заслуги В. С. Кулебакина перед страной, наградив его: орденом Ленина, орденом Трудового Красного Знамени, тремя орденами Красной Звезды, орденом Знак Почета и несколькими медалями.

Доктор техн. наук, проф. Г. Н. ПЕТРОВ

Доктор техн. наук, проф. А. Я. БУЙЛОВ

Кандидат техн. наук, доц. Д. Э. БРУСКИН



Единые правила эксплуатации электроустановок промпредприятий

Как известно, до сих пор эксплуатация фабрично-заводских электроустановок СССР не была регламентирована каким-либо единым руководящим документом.

По решению правительства Государственной инспекцией по промэнергетике и энергонадзору при Министерстве электростанций СССР при участии специалистов двадцати хозяйственных министерств составлены и изданы единые «Правила технической эксплуатации электроустановок промышленных предприятий», обязательные для промышленных предприятий всех министерств и ведомств.

Одно из главных значений вводимых Правил выражено во втором параграфе первой главы следующими словами: «эксплуатация электрохозяйства должна производиться так, чтобы обеспечить максимальное выполнение производственного плана предприятия при наименьшем расходе электроэнергии».

Правилами охватываются вопросы организации эксплуатации различных электроустановок промпредприятий, электрических сетей, распределительных устройств, щитов управления, релейной защиты и вторичной коммутации, принадлежащих предприятиям силовых трансформаторов всех напряжений, различных электроприводов, аппаратуры электропечных цехов, преобразователей, установок для промыш-

ленного электролиза и гальванопокрытий, электросварочных устройств, электрогазоочистных устройств, статических конденсаторов, электроосветительных устройств, заземлений, установок для защиты от атмосферных перенапряжений 3—35 кВ и электроизмерительных приборов.

Заключительная глава Правил посвящена постановке учета расходования промпредприятиями электроэнергии.

Правила обобщают положительную практику эксплуатации электроустановок, накопленную лучшими коллективами энергетиков промпредприятий СССР.

Правила устанавливают единые и наиболее эффективные методы технически-рациональной эксплуатации электрооборудования промпредприятий СССР.

Правила распространяются на внутризаводские воздушные линии электропередачи до 10 кВ включительно, кабельные сети и распределительные устройства до 35 кВ и другие электросиловые устройства, обеспечивающие электроснабжение промпредприятий и участвующие в технологическом процессе производства.

Единые «Правила технической эксплуатации электроустановок промышленных предприятий» являются основой дальнейшей рационализации советского фабрично-заводского электрохозяйства.

Инж. Ф. Л. ВЕЙТКОВ



К вопросу о быстродействующем возбуждении синхронных машин

Об обзоре статьи Ланглуа-Бертело

(ЭЛЕКТРИЧЕСТВО, № 9, 1947)

1.

Основные выводы и положения реферируемой статьи Ланглуа-Бертело далеко не новы и почти все были в свое время опубликованы в отечественной литературе и в том числе в журнале «Электричество». Можно указать ряд советских работ, опубликованных более десяти лет назад; в этих работах польза регуляторов напряжения в смысле повышения статической устойчивости обоснована полнее и глубже, чем это сделал Ланглуа-Бертело. Значительным шагом вперед в отношении использования регулятора напряжения для повышения статической устойчивости была работа С. А. Лебедева «Исследование искусственной устойчивости».

В 1940 г. эффект регуляторов напряжения был широко использован в системе Азэнерго (см. статью И. А. Сыромятникова в журнале «Электрические станции», № 1, 1941). Опыт этой системы был затем распространен техническим отделом МЭС на все энергетические системы СССР¹.

Таким образом, влияние регулятора напряжения на повышение статической устойчивости было всесторонне исследовано в СССР намного раньше и гораздо полнее, чем в статье Ланглуа-Бертело, о чем в обзоре Н. И. Шиферсона следовало указать.

Влиянию быстродействующего возбуждения на динамическую устойчивость была посвящена специальная работа Р. М. Кантор «Быстродействующее возбуждение, как мера улучшения устойчивости» (отчет лаборатории систем ВЭИ, 1932 г.). Этот вопрос был затем освещен в статье С. А. Лебедева, П. И. Сазанова и Р. М. Кантор «Сравнительная оценка различных мер увеличения устойчивости» (Электричество, № 15, 1933).

В этих работах, выполненных и опубликованных за 14–15 лет до появления статьи Ланглуа-Бертело, имеется материал, содержащий больше сведений о влиянии быстродействующего возбуждения, чем в реферируемой статье. Между тем, в обзоре нет никаких ссылок на эти исследования.

Работами П. С. Жданова (Электричество, № 14, 1931), Д. И. Азарьева (Электричество, № 7, 1938), И. А. Сыромятникова (Электрические станции, № 1, 1941) было показано, что динамическая устойчивость не может рассматриваться без учета поведения асинхронной нагрузки. Поэтому для более обоснованного суждения о влиянии быстродействующего возбуждения следовало бы рассмотреть вопрос с учетом асинхронной нагрузки и уже после этого делать окончательные выводы. В статье Ланглуа-Бертело отсутствует такая постановка вопроса, поэтому приведенные в обзоре этой статьи выводы о параметрах возбудителей нельзя считать достаточно обоснованными.

Влияние быстродействующего возбуждения с учетом поведения асинхронной нагрузки исследовано в одной из работ электротехнической лаборатории ТНЭСГЭИ в 1943 г. Основные выводы, содержащие рекомендации по параметрам возбудителей, опубликованы Г. Н. Тер-Газаряном

(Электричество, № 3, 1945). Между тем, эта работа в обзоре также не отмечена.

ТНЭСГЭИ считает, что в обзоре допущено незаслуженное игнорирование имеющихся отечественных работ, значительно более содержательных и ранних, чем реферируемая статья. Материал обзора преподнесен, как новый для советских исследователей, вместо того, чтобы служить демонстрацией достижений советских электротехников в изучении затронутых вопросов.

Настоящее письмо должно помочь читателям правильно ориентироваться в вопросах, разбираемых в статье Ланглуа-Бертело.

Канд. техн. наук Г. А. ДЖИМШЕЛЕИШВИЛИ
Тбилисский научно-исследовательский институт
сооружений и гидроэнергетики

2.

Обзор Н. И. Шиферсона не только не дает ничего нового, но и содержит ряд неправильных рекомендаций, которые могут дезориентировать читателей журнала.

Требование производить пуск схемы автоматического регулирования возбуждения при понижении напряжения порядка 10% от органа, реагирующего на скорость изменения напряжения, является неправильным. Как показал опыт эксплуатации энергосистем, пуск от органа, реагирующего на величину напряжения, удовлетворяет требованиям эксплуатации и нет никакой необходимости в излишнем усложнении схемы возбуждения.

Неправильно указание и на то, что потолочное возбуждение следует держать с выдержкой времени не более 2–5 сек., и что в случае, если напряжение системы продолжает оставаться ниже 10% от нормального, то необходимо довести возбуждение до полуторакратной величины и держать его в течение 2–5 min., а если и после этого напряжение продолжает оставаться ниже 10% от нормального, то необходимо довести возбуждение до нормальной величины.

Автор статьи и очевидно автор обзора, повидимому, не совсем ясно представляют себе явления, происходящие в системе при ненормальных режимах, при которых приходит в действие устройство форсировки возбуждения. Ланглуа-Бертело исходит из чисто «теоретических» соображений, а автор обзора не отразил богатейший опыт эксплуатации систем в Советском Союзе, в которых большинство синхронных машин оборудовано устройствами форсировки возбуждения.

Учитывая, что некоторые советские специалисты неоднократно высказывались против установки на синхронных машинах устройств форсировки возбуждения, ссылаясь на опасность длительных перегрузок, которые якобы будут при этом иметь место, считаю необходимым несколько подробнее остановиться на вопросе о возможных перегрузках синхронных машин, снабженных устройствами форсировки возбуждения.

Перегрузка синхронных машин при работе устройств форсировки возбуждения может иметь место во время короткого замыкания, при восстановлении напряжения

¹ См. статью И. А. Сыромятникова, Электричество, № 6, 1946.

после отключения короткого замыкания и при аварийном отключении генерирующей мощности в системе. Длительность короткого замыкания в самом неблагоприятном случае не превышает времени действия резервной защиты генераторов, т. е. 6—10 сек. В громадном числе случаев короткое замыкание наблюдается порядка 1—2 сек. Перегрузка синхронных машин при восстановлении напряжения после отключения короткого замыкания объясняется тем, что асинхронные двигатели, снизившие свои обороты за время короткого замыкания, потребляют повышенные токи при самозапуске. Если восстанавливающее напряжение достаточно для разворота двигателей до нормальных оборотов, то длительность перегрузки будет составлять не больше 5—10 сек. Если же восстанавливающее напряжение будет недостаточно для разворота двигателей, то они еще больше уменьшат свои обороты и будут отключены своей защитой. В этом случае длительность перегрузки также не может быть больше 5—10 сек.

При отключении генерирующей мощности в системе и отсутствии резерва частота в системе снизится и для восстановления нормальной частоты необходимо отключать потребителей. Отключение потребителей при аварийном снижении частоты производится автоматами разгрузки по частоте или от руки дежурным персоналом. Длительная перегрузка синхронных машин при наличии автоматической разгрузки по частоте продолжается не более 5—10 сек.

Таким образом, в подавляющем большинстве случаев

длительное действие форсировки возбуждения не может иметь места. Поэтому не следует вносить дополнительные элементов в схемы автоматического регулирования возбуждения для ограничения действия потолочного тока возбуждения.

Рекомендация же Ланглюа-Бертело снижать возбуждение до нормальной величины в случае, если напряжение длительное время остается ниже 10% от нормальной приведет в большинстве случаев к полному развалу системы из-за лавины напряжения.

В обзоре предлагается отключать автомат гашения поля при выпадении генератора из синхронизма при помощи специального реле. Как показывает опыт эксплуатации, специальная защита, реагирующая на качания, не нужна. Длительные качания могут иметь место, как правило, только в системах со слабыми связями из-за увеличения перетоков мощностей сверх допустимых. Для прекращения качаний нужно устранить причину, вызывающую качания, т. е. уменьшить переток до допустимой величины или произвести деление системы на части.

В большинстве случаев отключение автомата гашения поля у генераторов при качаниях приведет к полному развалу системы.

Такова «ценность» рекомендаций автора статьи, не критически повторенных Н. И. Шиферсоном в обзоре.

Канд. техн. наук **И. А. СЫРОМЯТНИКОВ**
Технический отдел МЭС

ОТ РЕДАКЦИИ

Опубликованный в журнале *Электричество* (№ 9, 1947) обзор Н. И. Шиферсона по статье Ланглюа-Бертело *Bulletin de la Société Française des Electriciens* (№ 57, март 1946), хотя и содержит указания на достижение энергосистем СССР в области внедрения быстродействующего возбуждения синхронных машин, а также содержит некоторую критику статьи, однако в целом не дает полного и правильного представления освещаемого вопроса.

Помещенные выше письма Г. А. Джимшелейшвили и И. А. Сыромятникова, вскрывая недостатки статьи Ланглюа-Бертело и ее обзора, правильно ориентируют читателей в вопросе быстродействующего возбуждения синхронных машин.



Неправильное изложение вопросов электротехники в учебнике А. И. Августинника

Государственное научно-техническое издательство химической литературы выпустило в свет книгу доктора техн. наук А. И. Августинника¹. Значительная часть книги не связана непосредственно с вопросами электротехники. Однако, в книге имеется большой раздел (VI)—«Электрохимия силикатных систем», в котором излагаются вопросы не только электрохимии, но и электрофизики и даже прикладной электротехники; имеется также ряд параграфов, посвященных электрическим свойствам твердых тел. В связи с широким развитием керамической, стеклянной, слюдяной и асбестовой электрической изоляции силикаты интересуют многих электриков. Более того, книгой А. И. Августинника уже пользуются как пособием студенты и аспиранты электротехнических специальностей. В связи с этим мы вынуждены сделать некоторые замечания, касающиеся изложения в этом учебнике вопросов, связанных с электротехникой и в особенности с теорией электрической изоляции.

В книге имеется ряд совершенно неправильных утверждений. Например, на стр. 298 сказано: «В диэлектрике под влиянием внешнего поля возникает встречная э. д. с. Эта сила называется поляризацией. Величина ее спадает очень быстро». Получается, что э. д. с. поляризации (которую автор назвал неверно просто «поляризацией») спадает в то время, когда диэлектрик находится под действием приложенного внешнего напряжения. Это неправильно и далее опровергается самим автором [табличка на стр. 299 и формула (159)]. Ряд грубых ошибок в изложении явлений поляризации на стр. 297 и далее объясняется тем, что автор смешал два совершенно различных понятия — высоковольтную поляризацию, имеющую, как известно, электролитическую природу, и поляризацию смещения. На рис. 116 (влияние напряжения поля на удельное электрическое сопротивление диэлектрика) масштаб по оси ординат отличается от истинного в 10^{10} раз (должно быть помещено $10^{12} \Omega \text{ см}$, но автор указывает $10^2 \Omega \text{ см}$), а при изложении опытов Н. Мандрыки по изучению влияния напряженности поля на величину $\tan \delta$ (стр. 307) автор делает ошибку в тысячу раз, так как приводит единицу V/см вместо kV/см . На рис. 115 сообщаются неправильные данные о характе-

¹ А. И. Августинник. Физическая химия силикатов. Допущено Министерством высшего образования СССР в качестве учебника для вузов. Госхимиздат, 1947 г., 324 стр., ц. 17 руб., тираж 3 000 экз. Редактор издательства А. И. Шатенштейн.

изменения электропроводности окиси магния при высоких температурах, причем график построен по четырем измерениям, взятым (через посредство „Технической энциклопедии“ издания 1930 г.) из работы, опубликованной еще в 1906 г. и, насколько нам известно, не подтвержденной новейшими работами.

При рассмотрении диэлектрических потерь на стр. 306 автор объясняет явления, „связанные с поглощением некоторого количества энергии“, прохождением реактивного тока J_p . Очевидно, что и определение $\operatorname{tg} \delta$, как отношения „сквозного тока или тока проводимости“ J_a к току J_p , абсурдно.

Формула для расчета удельной мощности потерь* (стр. 307) дана в виде

$$p = \frac{\epsilon \cdot f \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot U^2}{1,8 \cdot 10^{12}} \text{ W/sec}$$

... где U — вольты*. Эта формула совершенно неверна: вместо U здесь надо поставить напряженность поля E В/см, а вместо W/sec написать W/cm^3 . Непосредственно далее автор пишет: „1 W/sec соответствует 0,24 cal/sec“ (!). Вообще путаница с единицами измерения в книге А. И. Августинника — не редкость. Так, удельное объемное электрическое сопротивление он предлагает измерять на стр. 295 в Ω , а на стр. 305 — в Ω/cm^3 . И то и другое неверно. Единицей в этом случае является Ωcm . На стр. 304 и 306 автор говорит о напряжении в В/см, на стр. 137 определяет теплоемкость в cal/g/grad, на стр. 74 сечение проволоки в мм, на стр. 57 запутывается в определении термина „кларк“.

Утверждение „Величина $\operatorname{tg} \delta$ в твердых диэлектриках возрастает по мере увеличения частоты“ (стр. 307) дезориентирует читателя. Как раз у силикатных диэлектриков, например керамики и стекол, при изменении частоты в весьма широких пределах $\operatorname{tg} \delta$ обычно уменьшается при росте частоты или остается постоянным, и это обстоятельство имеет громадное практическое значение, что, кстати, подтверждается и самим А. И. Августинником, судя по рис. 118. Рост $\operatorname{tg} \delta$ наблюдается, да и то не всегда, лишь в области очень высоких частот. Совершенно неверно и то, что диэлектрические потери SiO_2 и B_2O_3 „не возрастают и при высоких температурах“ (стр. 309).

Не может быть оправдано и само построение раздела „Электрохимия силикатных систем“. Этот раздел распадается на главы: 1 — „Электропроводность и влияние на нее различных факторов“ и 2 — „Электролиз“. В гл. 1 изложены вопросы смещения и диэлектрических потерь, не связанные с электропроводностью, но не затронуты вопросы электролиза, которые как раз следовало бы отнести к главе об электропроводности. Краткое, но запутанное изложение вопросов пробы диэлектриков (в том числе теплового пробы) почему-то тоже попало в рубрику „электролиз“.

Можно было бы указать еще ряд подобных ошибок. Повидимому, они не случайны, а являются следствием недостаточного знакомства автора с теорией электричества.

Наряду с рядом случайных, маловажных и устаревших сведений, содержащихся в книге, многие данные, актуальные для современной теории строения силикатов, электрокерамики, электротермии, электровакуумной техники и т. п., в книге пропущены.

Автор не обнаруживает знакомства с достижениями советской науки и техники в рассматриваемых им областях и весьма часто подчеркивает роль зарубежных ученых и фирм в ущерб более полному освещению достижений в этой области в СССР. На стр. 82 и далее автор рассматривает формулу Мосотти-Клаузиуса, не упоминая о том, что советский ученый Г. И. Сканава показал ее полнейшую непригодность для целого ряда диэлектриков, в частности керамических, и дал более точный анализ поляризуемости. На стр. 305, говоря об электрических свойствах многокомпонентных стекол (минимум потерь), автор считает нужным упомянуть малозначительную работу Седдона, Митчелла и Тернера (опубликованную в 1939 г.) и в то же время ничего не говорит о работах Г. И. Сканава и Н. П. Богородицкого, которые на несколько лет раньше дали основной экспериментальный материал и теоретический анализ рассматриваемых явлений в ряде статей, печатавшихся, начиная с 1935 г. В указателе литературы (в конце книги) нет ни одного издания, появившегося после 1941 г.

Наконец, в данной книге, в основном теоретического, а не технологического характера, может быть, и не следовало вообще говорить о номенклатуре практически применяемых типов силикатных диэлектриков. Однако, поскольку автор все же вкратце это делает (стр. 309), совсем не оправдано упоминание ряда зарубежных стеатитовых и титановых электроизоляционных материалов с их фирменными названиями (к слову сказать, и в этом перечне есть ошибки) при одновременном умолчании о многочисленных аналогичных материалах, разработанных советскими исследователями (Б. М. Вул, Н. П. Богородицкий, Г. И. Сканава, Г. А. Смоленский, С. Н. Грачев, И. Д. Финкельштейн и др.) и успешно производимых и потребляемых предприятиями СССР.

Таким образом, в книге (допущенной в качестве учебника для вузов) имеются серьезные дефекты в изложении вопросов, непосредственно относящихся к электро-технике и, в частности, к электроизоляционной технике.

Канд. техн. наук Х. С. ВАЛЕЕВ

Заведующий электрофизической лабораторией
Государственного электрокерамического института

Канд. техн. наук Б. М. ТАРЕЕВ

Заведующий кафедрой электро материаловедения
Всесоюзного заочного энергетического института



Электрические конденсаторы

В. Т. РЕННЕ. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ. Госэнергоиздат, 1947, 191 стр., тираж 5 000 экз., цена 15 руб.

Электроконденсаторостроение за последние 10—20 лет выросло в самостоятельную отрасль электротехнической промышленности, применяющую разнообразные материалы и различные технологические приемы и методы производства. В связи с этим выход из печати книги В. Т. Ренне, в которой делается успешная попытка систематизировать накопленный производственный опыт по изготовлению различных типов конденсаторов и вместе с тем описать основные свойства конденсаторов, следует приветствовать.

Книга предназначена для инженеров и техников-электриков, а также для студентов старших курсов электротехнических вузов и техникумов. Она состоит из введения, пяти глав и библиографического указателя. Введение содержит краткий обзор истории конденсаторостроения и классификацию конденсаторов. Большое внимание автор уделяет общим свойствам конденсаторов, которым посвящена первая глава. В этой главе даются краткие сведения из теории переменных токов и физики диэлектриков. Во второй главе приводятся данные о конденсаторах с газообразным и жидким диэлектриком. Третья глава посвящена изложению свойств конденсаторов с твердым неорганическим диэлектриком разных типов. Четвертая глава содержит сведения о конденсаторах с твердым органическим диэлектриком. Наконец, в пятой главе излагаются особенности и методы производства электролитических конденсаторов.

Достоинством книги является прежде всего систематичность изложения материала. Классификация конденсаторов, приведенная во введении, является полной и обобщенной. Содержание книги точно соответствует этой классификации. Читатель, таким образом, получает ясное и достаточно полное представление о всех важнейших типах конденсаторов, об их основных особенностях и областях применения. Ценно и то, что описание электрических свойств каждого типа конденсатора тесно связано с его конструкцией и технологией производства.

Книга написана простым и ясным языком.

В главе первой (Общие свойства конденсаторов) материал подобран удачно; при малом размере главы (25 стр.) четко описаны все основные свойства конденсаторов. Однако эта глава содержит и некоторые ошибки. Так, в § 9 при изложении вопроса об абсорбционном токе в диэлектрике не упоминается одна из наиболее распространенных причин, вызывающих этот ток — наличие неоднородностей. В § 13 указывается, что диэлектрическую проницаемость можно рассматривать как сумму четырех составляющих, соответствующих основным типам поляризации, и приводится формула

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_d + \epsilon'_i + \epsilon''_i,$$

где ϵ_e — диэлектрическая проницаемость, обусловленная электронной поляризацией, ϵ_d — дипольной поляризацией, ϵ'_i — ионной поляризацией за счет связанных ионов, и ϵ''_i — ионной поляризацией за счет полусвободных ионов.

Кроме некоторой неточности этого разделения и применяемой терминологии (полусвободные ионы участвуют и в быстро устанавливающейся упругой поляризации ионного смещения, а не только в релаксационной поляризации), надо отметить и то, что полная диэлектрическая

проницаемость не может арифметически складываться из отдельных диэлектрических проницаемостей, обусловленных различными видами поляризации; складываются величины удельных (молекулярных) поляризаций $(\epsilon - 1) : (\epsilon_0 V)$, и то только в том случае, когда к диэлектрику приложено уравнение Клаузиуса-Мосотти, т. е. когда внутреннее поле равно лорентцову. Вопрос об определении суммарной поляризации в диэлектриках, для которых уравнение Клаузиуса-Мосотти неприменимо, значительно усложняется. В ряде случаев внутреннее поле заметно изменяет соотношение между отдельными видами поляризации в смысле их влияния на величину диэлектрической проницаемости. В том же § 13 имеется утверждение о том, что ионная упругая поляризация не зависит от частоты вплоть до $10^7 \div 10^8$ Hz. На самом деле, эта зависимость распространяется на значительно более высокие частоты ($10^{12} \div 10^{13}$ Hz), сравнимые с частотами собственных колебаний ионов в твердом диэлектрике. Не вполне точно разделение поляризации на обратимую и не-обратимую; запаздывающая поляризация в строгом смысле слова также является обратимой. В § 17 не дано определение теплового пробоя, без чего читатель не сможет составить себе ясной картины этого распространенного вида пробоя конденсаторов.

Глава вторая (Конденсаторы с газообразным и жидким диэлектриком) содержит достаточно полные сведения о конструкции и свойствах этих конденсаторов. Весьма ценно подробное описание конструкции и свойств переменных и полупеременных конденсаторов, о которых в литературе имеется сравнительно мало сведений. К сожалению, не приведены подробные характеристики имеющихся большие перспективы конденсаторов с элегазом; о них автор упоминает лишь вскользь.

Глава третья (Конденсаторы с твердым неорганическим диэлектриком) содержит много полезных сведений, в особенности по слюдяным конденсаторам. В таблице свойств керамических материалов (стр. 96—97) не приведены данные о разбросе значений температурного коэффициента диэлектрической проницаемости (TK_ϵ) ряда конденсаторных керамических материалов, имеющем большое значение для изготовления конденсаторов с заданным значением температурного коэффициента емкости.

Автор не отмечает, что в настоящее время имеется по крайней мере две разновидности тиконда с различными ϵ и TK_ϵ . Графики, иллюстрирующие диэлектрические свойства керамических конденсаторов, взяты из иностранных источников, хотя в советской журнальной литературе имеется не менее, а может быть и более полный материал. Следовало бы привести описание основных производств в СССР в последнее время высоковольтных керамических конденсаторов для высокочастотных печей.

В главе четвертой (Конденсаторы с твердым органическим диэлектриком) основное внимание уделено бумажным конденсаторам, которые по массовости выпуска стоят на первом месте среди всех других конденсаторов. Этот раздел главы изложен очень удачно. Автор сумел в небольшом объеме дать большое количество полезных и точных сведений о бумажных конденсаторах. Жаль только, что, давая различные формулы для электрических свойств бумажных конденсаторов, автор не показывает, какие из этих формул являются эмпирическими, т. е. лишь

общают экспериментальный материал, и какие базируются на теории. Так, эмпирическая формула зависимости пробивного напряжения от времени («кривая жизни») дается рядом с вытекающим из теории теплового пробоя соотношением между сопротивлением изоляции, на котором возможен тепловой пробой, и заданным напряжением.

Ценным материалом в этой главе являются данные о способах изготовления и свойствах конденсаторов с диэлектриком из искусственных пленок, слабо освещенные в литературе.

Глава пятая содержит достаточно полные и интересные сведения об электролитических конденсаторах. Хотелось бы только, чтобы в этой главе относительно большее

внимание было уделено весьма важному вопросу о морозостойкости этих конденсаторов.

В конце книги приведен подробный указатель литературы. Относительно менее исчерпывающе представлена здесь литература по конденсаторам с неорганическим диэлектриком.

Несмотря на указанные выше отдельные недочеты, книга В. Т. Ренне является ценным пособием для лиц, применяющих и производящих электрические конденсаторы.

Доктор физико-матем. наук, проф. Г. И. СКАНАВИ



АНГЛО-РУССКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ. Под редакцией проф. Л. Д. Белькинда. Гостехиздат, 1946, 500 стр., тираж 75 000 экз., цена 75 руб.¹

Составление и издание технического словаря такого масштаба, как рассматриваемый, всегда представляет собой выполнение важного культурного значения. Подобная работа является не только лексикографической, но и подводит определенные итоги развития технического языка и терминологии.

Существует два типа иностранных технических словарей: 1) отраслевые, со специализированным содержанием, охватывающим какую-либо одну отрасль техники, 2) политехнические, по типу которых построен рассматриваемый словарь, включающие терминологию всех отраслей техники и, отчасти, физику и математику.

Хотя в нашей практике привились оба типа словарей, все же, конечно, следует отдавать предпочтение словарю именно политехнического типа по таким соображениям: в современных условиях технические задачи ставятся и решаются комплексно, с использованием различных отраслей техники, которые зачастую бывают тесно переплетены между собой. Поэтому пользование одним только отраслевым словарем редко приводит к цели, необходимость же обращаться одновременно к нескольким словарям затрудняет работу переводчика. Политехнический словарь является намного более компактным, чем отраслевые словари, вытиснутые вместе, так как в них неизбежны повторения и некоторый параллелизм. Следовательно, путь, по которому пошли составители рецензируемого словаря, избрав для него политехническое содержание, можно признать безусловно правильным.

К содержанию всякого технического словаря могут быть предъявлены три основных требования:

1) Словарь должен быть полным, т. е. охватывать, по возможности, всю терминологию в пределах намеченного содержания.

2) Словарь должен находиться на современном уровне развития техники.

3) Переводы отдельных слов и терминов в словаре должны отличаться максимальной точностью.

К этим общим требованиям словаря добавляются в данном случае еще требования, обусловленные спецификой англо-американского технического языка. Здесь имеет место параллельное существование различных терминов и обозначений для одних и тех же понятий в Англии и в США. Кроме того, технические тексты в английской и американской литературе характеризуются обилием эпитетов, описательных оборотов речи и терминов, наличием большого числа сокращений и условных обозначений.

Труд составителей англо-русского технического словаря осложняется еще тем обстоятельством, что техническая терминология во многих вопросах техники, особенно новейшей, недостаточно разработана. Поэтому составителям словаря зачастую вместо роли переводчика приходится выполнять другую роль — создателей новой терминологии.

Переходя к оценке «Англо-русского политехнического словаря» в части его электротехнической терминологии,

¹ В настоящей рецензии рассматривается лишь часть словаря, посвященная электротехнике и электричеству.

нужно прежде всего сказать, что составителями его проделана громадная работа. Технического словаря с такой полнотой содержания в Советском Союзе не существовало. Шрифт и общее оформление, если отвлечься от вопроса о бумаге, качество которой не высоко, заслуживают одобрения. Несомненно, рецензируемый словарь встретит самый широкий спрос.

Однако, если подходить к оценке словаря под углом зрения основных требований, перечисленных выше, приходится сделать целый ряд замечаний.

Во-первых, словарь не выдерживает требования относительно полноты содержания. Довольно много терминов и даже ходовых технических выражений оказывается пропущенным.

В качестве иллюстрации можно указать на отсутствие таких весьма распространенных слов, как: sub-exciter — подвозбудитель, вспомогательный возбудитель; speed voltage generator — тахометрический генератор, таходинамо; four-terminal network — четырехполюсник; zero sequence; positive sequence; negative sequence — нулевая, прямая и обратная последовательность и много других.

В словаре нет ни одного из терминов, обозначающих управление или регулировку скорости по схеме Леонарда: adjustable generator voltage control; variable voltage control; Ward-Leonard control.

Пропущены некоторые термины из области математики, необходимые при переводе теоретических статей по электротехнике, например: vinculum — угол; inverse sine — арксинус и др.

Имеются пропуски и в разделе «Наиболее употребительные сокращения», помещенном в конце словаря. Из них мы укажем на такие, как: s. c. — squirrel cage — беличья клетка, с беличьей клеткой; s. r. — slip ring — контактное кольцо, с контактными кольцами и др.

Во-вторых, в словаре не выдержано и следующее требование — охвата новейшей терминологии и соответствия современному развитию техники. Создается впечатление, что уровень техники, к которому относится словарь, заканчивается примерно 1937—1938 гг., т. е. предвоенной эпохой и что составители не успели отобразить в своей работе более новой терминологии. Пропущены в этом направлении, в части электротехнической терминологии, достаточно многочисленные. Таковы: amplifier — электромашинный усилитель, radar — радиолокационная установка, silicone — кремнийорганический полимер, precipitator — электрофильтр, электростатическая установка высокого напряжения для улавливания из воздуха частиц пыли; degaussing — размагничивание (судна), устранение магнитного силового поля и др.

Особенно ощутительны пробелы из области сравнительно молодой, но бурно растущей дисциплины — теории автоматического регулирования. Здесь перечень пропущенного можно начать со слов: servo, servo-mechanism, servo-system — следящая система, следящий механизм; error — расхождение, рассогласование; overshoot — перерегулирование; follow-up system — следящая система и др.

Правда, нельзя закрывать глаза на огромные трудности, которые стояли перед составителями словаря в связи с отсутствием вполне установившейся, общепринятой терминологии в области теории автоматического регулирования. Имеются также пробелы в области электротехнических материалов.

Далее, следует отметить, что переводы отдельных слов и терминов в словаре не всегда отличаются точностью и полнотой и, к сожалению, имеют место иногда и неправильные переводы. Так, «alternating current» переводится как «переменный ток»: это неполно и недостаточно, так как в английской и, особенно, в американской технической литературе этот термин имеет специфическое значение «однофазный ток» в отличие от «polyphase current» и «three-phase current». Например, «alternating current motor» следует переводить как «однофазный двигатель», а не «двигатель переменного тока».

Слово «diverter» переведено двумя значениями: «отводный канал» и «направляющий или отклоняющий лист». Нужно добавить еще третье значение — устройство для защиты высоковольтной линии от грозных разрядов.

Перевод термина «dry-disc rectifier» как «контактный выпрямитель» является искажением общепринятой терминологии и должен быть заменен на «сухой, твердый выпрямитель».

Сделанные замечания ни в какой степени не могут умалить той весьма полезной работы, которую выполнили составители словаря. Хотелось бы однако высказать еще

ряд пожеланий и выводов относительно дальнейшего развития словаря.

Ни один технический словарь не может оставаться в «застывшем» состоянии: техника развивается непрерывно и требует соответственного пополнения словаря новой терминологией.

Представляется необходимым развернуть работу по подготовке расширенного и улучшенного издания и привлечь к этой работе коллектив высококвалифицированных специалистов. При составлении нового издания словаря (или «дополнения» к нему) следует учесть следующие соображения:

1) Необходимо полностью и критически пересмотреть содержание всех выпущенных у нас за последние годы англо-русских технических отраслевых словарей (по строительному делу, металлургии, металлообработке, текстильной промышленности, авиации и т. д.) и отобрать из них все, что еще не вошло в «Политехнический словарь».

2) Необходимо пересмотреть и использовать новейшие нормы, стандарты, работы по технической терминологии и т. п.

3) Полезно возле некоторых слов и терминов указывать в скобках их происхождение (Англия или США), если эти термины являются специфическими или ходовыми только для Англии или только для США.

4) Полезно также поместить в словаре таблицу перевода англо-американских единиц измерения в метрические.

Кандидат техн. наук Л. Б. ГЕЙЛЕР



Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике

Издания 1947 г.¹

Алаторцев С. А. Справочник шахтного электрика. Под ред. Ф. Н. Шклярского. Углетехиздат, 96 стр., ц. 7 руб. 40 коп.

Альперт Я. А. Распространение радиоволн в ионосфере. Гостехиздат, 276 стр., ц. 10 руб.

Арутюнов В. О., Валицкий В. П. Электроизмерительные приборы. Устройство, монтаж и обслуживание. Госэнергоиздат, 199 стр., ц. 7 руб. 50 коп.

Бажанов С. А. Как работает радиолампа. Классы усиления. (Массовая радиобиблиотека, под общей ред. А. И. Берга, вып. 1.) Госэнергоиздат, 48 стр., ц. 1 руб. 50 коп.

Балуев В. К. Электротехнические средства инженерного вооружения. Изд. 3-е, переработанное. Под ред. Н. Н. Луценко. Военное изд-во, 424 стр., ц. 10 руб. 25 коп.

Баптиданов Л. Н., Тарасов В. И. Электрооборудование электрических станций и подстанций. Т. 1. Основное электрооборудование, схемы и конструкции распределительных устройств. Госэнергоиздат, 399 стр., ц. 25 руб.

Батманов В. А. Электросварка в ремонтном деле, 131 стр., ц. 6 руб.

Бельский И. Р. Электрическое освещение полиграфических предприятий. Под ред. В. А. Круковского. Гизлегпром, 72 стр., ц. 4 руб.

Берман В. А. Руководство по электрическим измерениям кабелей ГТС. Связьиздат, 94 стр., бесплатно.

Бесекерский В. А. Дистанционное управление артиллерийскими установками. Ленинградский ордена Красного знамени военно-механический институт, 264 стр., ц. 30 руб.

Булаков К. В. Электрические станции и подстанции. Ленинградский заочный индустриальный институт, 139 стр., ц. 15 руб.

Быков П. Л. Ручное электросверло ЭБР-6. (Министерство угольной промышленности западных районов СССР. Гипроуглемаш). Углетехиздат, 28 стр., бесплатно.

Варгафтик Н. В., Голубцов В. А., Степаненко Н. И. Электрический метод определения влажности нефтепродуктов. Гостехиздат, 60 стр., ц. 2 руб.

Веселовский В. С., Шманенков И. В. Нагревательные приборы в лабораторной практике. Изд. 4-е, переработанное. Госхимиздат, 184 стр., ц. 8 руб.

Вейц В. И. Структура энергетического баланса и основы электрификации, газификации и теплофикации промышленности. (Комитет по участию СССР в международных энергетических объединениях. Мировая энергетическая конференция. Гаагский топливно-экономический конгресс 2—9 сентября 1947 г.) Госэнергоиздат, 17 стр., ц. не указана.

Вологдин В. П. Атомная энергия. (Серия «Ученые-школьникам»). Детгиз, 24 стр., ц. 70 коп.

Волькенштейн Ф. Ф. Электропроводность полупроводников. Гостехиздат, 352 стр., ц. 14 руб. 25 коп.

Гемке Р. Г. Неисправности электрических машин. Изд. 3-е. Под ред. Б. М. Гончаренко. Госэнергоиздат, 240 стр., ц. 15 руб.

Герасимов В. В., Миловидов И. Н., Ягодин Г. В. Основы электротехники. Пособие для военных училищ и офицерского состава войск связи. Под ред. Г. В. Ягодина. Изд. 2-е, переработанное. Военное изд-во, 464 стр., ц. 12 руб.

Гладков И. А. В. И. Ленин и план электрификации России. Госпланиздат, 112 стр., ц. 3 руб.

Глазунов А. А. Сети электрических систем. Допущено в качестве учебника для энергетических и электротехнических вузов и факультетов. Госэнергоиздат, 64 стр., ц. 20 руб. 25 коп.

Глезер Б. И., Лезнов С. И., Шадрин А. К. Сборник предложений по экономии электрической и тепловой энергии, премированных на Всесоюзном конкурсе 1946 г. Под ред. А. А. Максимова. (Госинспекция по промышленности энергонадзора при Министерстве электростанций СССР и ВНИТОЭ.) Госэнергоиздат, 268 стр., цена не указана.

¹ Электричество № 7, стр. 96 и № 12, стр. 75, 1947.

- Горелик Г. С., Левин М. Л. Радиолокация. Гостехиздат, 32 стр., ц. 50 коп.
- Гребельник П. Т. Автоматическая сварка под слоем флюса. Горьковский обл. изд-во, 135 стр., ц. 2 руб. 80 коп.
- Гурфинкель Б. Б. Растянутые диапазоны. (Массовая радиобиблиотека под общей ред. А. И. Берга, вып. 2.) Госэнергоиздат, 64 стр., ц. 2 руб.
- Дамский А. И. Осветительная арматура. Изд-во Академии Архитектуры СССР, 136 стр., ц. 10 руб.
- Даханов В. Н. Электрическая разведка методом спир. Гостехиздат, 140 стр., ц. 8 руб.
- Деркач В. Г., Дацюк И. С. Электромагнитные процессы обогащения. Металлургиздат, 268 стр., ц. 16 руб.
- Джигит И. С. Современные радиолокационные системы. ВНИТО радиотехники и электросвязи им. Попова, 30 стр., ц. 15 руб.
- Дмоховский В. В., Сулькин А. Г. Новая рентгеновская установка. Изд. ЦБТИ Министерства электропромышленности СССР, 96 стр., ц. 7 руб. 50 коп.
- Добровольский Г. В. Анализ нелинейных многополосников (применительно к преобразователям частоты). Изд-во Академии наук СССР, 212 стр., ц. 12 руб.
- Дозоров Н. И. Англо-русский словарь специальных терминов по радио. Гостехиздат, 340 стр., ц. 12 руб. 25 коп.
- Дугин А. И., Вавилов Н. Ф. Руководство к лабораторным работам по курсу «Электронные и ионные приборы». Изд. Военно-воздушной академии им. Жуковского, 30 стр., цена не указана.
- Дуплексный телеграфный аппарат Бодо армейского образца. (Управление вооружения и снабжения войск связи). Военное изд-во, 180 стр., 4 руб.
- Евдокимов П. И., Васин В. В. Руководство к лабораторным работам по курсу «Основы телевидения». Ч. 1. Изд. Военно-воздушной академии им. Жуковского, 19 стр., цена не указана.
- Елагина А. Огни колхозных электростанций. Под ред. М. А. Стекольниковой. «Молодая Гвардия», 104 стр., ц. 2 руб. 50 коп.
- Ефимов В. М., Стасюк В. Н. Мощные электровозы для открытых разработок бурого угля. Изд. Бюро техн. информации Мин. угольн. пром. вост. районов СССР, 28 стр., ц. 3 руб. 50 коп.
- Журавель З. С. Описание и инструкция по эксплуатации переносного селенового выпрямительно-зарядного устройства. Военное изд-во, 32 стр., цена не указана.
- Задачник по теоретическим основам электротехники. Ч. 1. Под ред. К. М. Поливанова и Г. В. Зевеке. Изд. Московского энергетического института им. Молотова, 21 стр., бесплатно.
- Иванов И. И., Кремлевский П. А., Стефанов В. С., Хвалковский А. В. и Яковлева А. Ф. Руководство к работам в лаборатории электро материаловедения. Ч. 1. Под ред. Н. Г. Дроздова. Изд. Московского энергетического института им. Молотова, 41 стр., бесплатно.
- Инструкция Л1—7 по проверке габаритов высоковольтных воздушных линий электропередачи (ВВС Мосэнерго). Госэнергоиздат, 23 стр. бесплатно.
- Инструкция П—20 по работе с универсальной штангой на высоковольтных подстанциях (ВВС Мосэнерго). Госэнергоиздат, 8 стр., бесплатно.
- Инструкция по эксплуатации бетонных реакторов. (Высоковольтная сеть Мосэнерго). Госэнергоиздат, 11 стр., бесплатно.
- Инструкция по эксплуатации электроэнергетической системы Метрополитена (МПС СССР, Московский метрополитен им. Кагановича). Трансжелдориздат, 71 стр., бесплатно.
- Каганович Я. М. Групповой аккумуляторный светильник. Изд. Бюро технической информации Министерства легкой промышленности восточных районов СССР, 1 стр., ц. 1 руб.
- Каганович Я. М. Рудничные аккумуляторные и бензиновые лампы. Углетехиздат, 104 стр., бесплатно.
- Канторович М. И. Операционное исчисление и нестационарные явления в электрических цепях. Изд. Военной академии связи им. Буденного, 146 стр., цена не указана.
- Капцов Н. А. Коронный разряд и его применение в электрофильтрах. Гостехиздат, 226 стр., ц. 8 руб. 60 коп.
- Кисунько Г. В. Основы теории электромагнитных полых резонаторов. Вып. 1. (Военная Академия связи им. Буденного). Военное изд-во, 72 стр., цена не указана.
- Китаев Е. В. Электротехника. Одобрено в качестве учебника для ремесленных училищ связи. Связьиздат, 224 стр., ц. 8 руб. 25 коп.
- Коршунов Б. С., Ишкин И. П. Руководящие указания по нормированию удельных расходов электроэнергии на производстве кислорода (Министерство электростанций СССР, Государственная инспекция по промэнергетике и энергонадзору). Госэнергоиздат, 17 стр., бесплатно.
- Лайнер В. И. Электролитическая полировка металлических изделий. Гизместпром, 74 стр., ц. 4 руб.
- Лайнер В. И. Электролитическая полировка и травление металлов. Машгиз, 243 стр., ц. 21 руб.
- Лебедев К. В. Катодный осциллограф типа ЛИ-51. Изд-во «Советское радио», 14 листов, цена не указана.
- Литвин П. Л. Важнейшие тенденции развития паровых электростанций США. Изд-во Центрального института информации Министерства черной металлургии СССР, 21 стр., бесплатно.
- Ломоносов В. Ю., Поливанов К. М. Электротехника. Основы теории. Утверждено в качестве учебника для подготовки среднего технического персонала. Госэнергоиздат, 294 стр., ц. 11 руб.
- Мандельштам Л. И. Полное собрание трудов. Т. II. Под ред. С. М. Рыгова. Изд-во Академии наук СССР, 399 стр., ц. 30 руб.
- Маркович И. М. Токи короткого замыкания и устойчивость параллельной работы электрических систем (Министерство высшего образования СССР. Всесоюзный заочный энергетический институт). Госэнергоиздат, 194 стр., подписное издание. Второй тираж этой же книги: Госэнергоиздат, ц. 8 руб., 50 коп.
- Масленников В. В., Гимчин А. П. Экспериментальное исследование целевых антенн. Изд. НИИ Министерства авиационной промышленности СССР, 25 стр., ц. 5 руб.
- Матвеев Е. Н. Судовая электротехника. Изд-во «Морской транспорт», 466 стр., ц. 30 руб.
- Менчиков И. И. Руководство к лабораторным работам по электротехнике. Изд. Московского механического института, 257 стр., цена не указана.
- Меркулов Н. Я. Новый тип аккумуляторного электровоза «Карлик». Изд. Бюро технической информации Министерства строительства топливных предприятий СССР, 7 стр., бесплатно.
- Мешков В. В. Осветительные установки. Госэнергоиздат, 640 стр., ц. 30 руб.
- Миндин Г. Р. Применение трубчатых предохранителей и разработка новых предохранителей для защиты электрических цепей (Министерство судостроительной промышленности. Научно-исследовательский институт им. Крылова). 10 стр., бесплатно.
- Минин Г. П., Спиридонов В. К. Электронизмерительные приборы (учебные таблицы). Госэнергоиздат, ц. 60 руб.
- Миролюбов Н. Н. Курс электротехники. Изд. Артиллерийской академии. 459 стр.
- Модель З. И. Вопросы построения мощных радиостанций. Госэнергоиздат, 206 стр., ц. 15 руб.
- Московский М. И. Технология электромашиностроения. Госэнергоиздат, 488 стр., ц. 26 руб.
- Научно-техническая сессия по электроприводу 8—13 декабря 1947 г. Тезисы докладов. Изд. ВНИТОЭ, 171 стр., цена не указана.
- О правильном выборе предохранителей для защиты силовых потенциальных трансформаторов. Противопожарный циркуляр 36 (Министерство электростанций СССР. Технический отдел). Госэнергоиздат, 5 стр., бесплатно.
- Островская С. А. Внедрите скоростную сварку. Под ред. Е. О. Патона (Академия наук УССР. Институт электросварки им. Патона). Изд-во Академии наук СССР, 46 стр., ц. 2 руб. 50 коп.
- Островский Е. П., Патон Б. Е. Трактор для скоростной сварки. Под ред. Е. О. Патона. (Академия наук УССР. Институт электросварки им. Патона.) Изд-во Академии наук УССР, 48 стр., ц. 2 руб. 50 коп.
- Ошеров В. Питание радиоприемников. Гостехиздат Украины, 35 стр., ц. 1 руб. 50 коп.

Павлов М. А., Кобозев В. Н. Технические условия по эксплуатации и уходу за электрооборудованием тракторов. Ставропольское краевое изд-во, 31 стр., ц. 2 руб. 15 коп.

Патон Б. Е. Сварочные головки и питание их током (Академия наук УССР. Институт электросварки им. Патона). Изд-во Академии наук УССР. 67 стр., ц. 6 руб.

Пестряков В. Б., Сачков Д. Д. Конструирование деталей и узлов радиоаппаратуры. Конденсаторы, катушки, переключатели. Госэнергоиздат, 286 стр., ц. 15 руб.

Петров Г. Н. Электрические машины. Ч. II. Коллекторные машины постоянного и переменного тока. Допущено в качестве учебника для энергетических и электротехнических втузов и факультетов. Госэнергоиздат, 329 стр., ц. 12 руб. 60 коп.

Погарский В. И. Эксплуатация силовых высоковольтных кабелей. Госэнергоиздат, 157 стр., ц. 6 руб. 75 коп.

Подгаецкий В. В. Производство флюса АН-3 для автоматической сварки. (Академия наук УССР. Институт электросварки им. Патона). Изд-во Академии наук УССР, 44 стр., ц. 4 руб.

Попов В. С. Электротехника. Допущено в качестве учебника для неэлектротехнических техникумов. Госэнергоиздат, 464 стр., ц. 15 руб. 50 коп.

Правила безопасности при эксплуатации электрических установок городских и сельских сетей. Изд. Латвэнерго, 78 стр., цена не указана (на латышском языке).

Правила устройства электротехнических установок сильного тока. Кабельные линии напряжением 35 кВ и ниже (Министерство электростанций и Министерство строительства предприятий тяжелой индустрии СССР). Госэнергоиздат, 15 стр., ц. 1 руб.

Правила безопасности при эксплуатации электрических устройств, станций и подстанций. МЭС СССР. Госэнергоиздат, 80 стр., ц. 5 руб. 25 коп.

Правила технической эксплуатации электроустановок промышленных предприятий (Министерство электростанций СССР. Государственная инспекция по промэнергетике и энергонадзору). Обязательны для промышленных предприятий всех министерств и ведомств. Госэнергоиздат, 134 стр., ц. 10 руб.

Рапопорт М. И. Измерение абсорбционных токов изоляции (МЭС СССР, Орггрэс). Госэнергоиздат, 7 стр., бесплатно.

Рационализаторские предложения. (Министерство электростанций СССР. Орггрэс). Госэнергоиздат, Вып. 10. Вопросы эксплуатации и ремонта электрического оборудования электростанций и электросетей. 32 стр., ц. 3 руб.— Вып. 12. Вопросы эксплуатации, ремонта и монтажа электрического оборудования электростанций и электросетей. 28 стр., ц. 2 руб. 25 коп.

Ремез Г. А., Литвин В. М., Кукин Н. П., Чаплинский А. Б. Радиодело. Под ред. Г. А. Ремез. Военное изд-во, 327 стр., ц. 7 руб.

Ривлин Л. Б. Обслуживание цехового электрооборудования. Госэнергоиздат, 236 стр., ц. 12 руб.

Рудаков М. Е. Инструкция по прокладке и монтажу высокочастотных пупинизированных 8-парных кабелей. (Министерство связи СССР). Связьиздат, 36 стр., ц. 2 руб. 15 коп.

Сазонов Н. А. Руководство для сельского электромонтера. Сельхозгиз, 320 стр., ц. 6 руб. 50 коп.

Сборник статей по щелочным элементам воздушной деполаризации. Под ред. З. А. Иофа. ЦБТИ Министерства промышленности средств связи СССР, 104 стр., ц. 9 руб.

Сборник информационных материалов Мосэнерго. Ч. I. Под ред. Д. Г. Чижова, Б. П. Бурьянова и др. Госэнергоиздат, 86 стр., ц. 6 руб.

Смирнов Л. П. Монтаж кабельных муфт (учебные таблицы). Госэнергоиздат, ц. 65 руб.

Соколов И. И. Курс физики. Учебник для средней школы. 4-е изд., Ч. III. Электричество. Оптика. Госизд УзССР, 352 стр., ц. 4 руб. (на узбекском языке).

Сысоев В. И. Испытание электрических машин переменного тока. Изд. Военно-воздушной академии им. Жуковского, 124 стр., цена не указана.

Темпер И. Ю. Приемно-усилительные радиолампы. Гостехиздат Украины, 67 стр., ц. 3 руб. (на украинском языке).

Терехов И. Н. Краткий курс радиодетекции (Управление военно-морских учебных заведений). Военное изд-во, 87 стр., ц. 3 руб.

Туричин А. М. Техника измерения и электроизмерительные приборы. Изд. Академии кораблестроения им. Крылова, 250 стр., цена не указана.

Фарадей М. Экспериментальные исследования по электричеству. Т. I. Пер. Е. А. Чернышевой и Я. Р. Шмидт-Чернышевой; комментарии и редакция Т. П. Кравца. Изд-во Академии наук СССР, 848 стр., ц. 43 руб.

Хог Б. Элементы радиотехники. Перевод с англ. К. Б. Мозель и В. С. Соловейчик, под ред. А. М. Бройде. Госэнергоиздат, 352 стр., ц. 12 руб.

Ширков В. В. Расчет антенногониометрической системы пеленгаторов типа Эджок. Военное изд-во, 140 стр., ц. 6 руб.

Шнейдер Э. Радиолокация. Пер. с англ. К. Н. Трофимова. «Советское радио», 143 стр., ц. 10 руб.

Шуцкой К. А. Инструкция по ремонту и налаживанию радиоприемников. Изд. Московского политехникума связи им. Подбельского, 12 стр., ц. 1 руб.

◇ ◇ ◇

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

Продолжается подписка
на 1948 г.

НА ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

ОРГАН АКАДЕМИИ НАУК СССР, МИНИСТЕРСТВА
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ СССР И МИНИСТЕРСТВА
ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР

Основан в 1880 году Русским техническим обществом

Журнал рассчитан на инженеров и научных работников в широкой области исследования и применения электричества и освещает основные теоретические и практические проблемы, связанные с развитием электротехники и электрификации СССР

ПОДПИСКА ПРИНИМАЕТСЯ НА ПОЧТЕ И В ОТДЕЛЕНИЯХ
«СОЮЗПЕЧАТИ»

12

номеров в год

по 12 печ.

листов

Подписная
цена на год

96

рублей