

П. Н. ЯБЛОЧКОВ
Пионер русской электротехники

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

8

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.	
Двинуть вперед развитие промышленной электротермии	1	<i>А. С. Кантер</i> — Учет размагничивающего влияния тока к. з. при делении размеров постоянных магнитов машин переменного тока
<i>Г. Ф. Эдельштейн</i> — Состояние и задачи техники советского реле-строения	3	<i>В. Н. Лебедев</i> — О вычислении тока к.з. гидрогенератора для больших отрезков времени
<i>В. С. Квашинин</i> — Новые задачи промышленности электроизоляционных материалов	4	<i>Н. В. Горохов</i> — Теория однофазного индукционного регулятора
Из „Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей“	7	<i>Н. Н. Никифоровский</i> — О работе сухого выпрямителя в режиме кратковременной перегрузки
<i>А. И. Лурье</i> — Искусственное повышение проводимости заземляющих устройств	9	<i>А. Л. Горелик</i> — Применение полупроводников в качестве упреждающих сопротивлений
<i>А. С. Грамматчиков</i> — О проекте новых правил устройства заземлений	16	<i>Е. А. Михайленко</i> — Формовка металлических ртутных выпрямителей типа РВ 20/30 методом к.з.
<i>В. П. Тихонов</i> — Использование металлических конструкций здания, как заземления и рабочего нулевого провода	23	<i>Л. Г. Абелашвили</i> — Расчет контактных проводов на нагревание
<i>Л. П. Подольский</i> — К вопросу о воздействии электрического тока на человеческий организм	27	<i>А. А. Воробьев и Н. А. Приходько</i> — Исследование трансформаторов масел, содержащих прибавки кумароновых смол
<i>С. А. Кукель-Краевский</i> — Обобщенный метод выбора оптимальных параметров энергетических установок	30	<i>Л. А. Гончарский</i> — Магнито-электрический амперметр переменного тока
<i>Н. И. Булгаков</i> — Технические требования к конструкциям печных трансформаторов	40	<i>А. В. Трамбицкий, С. М. Гохберг, Э. П. Черногубовский, В. И. Игнатьев, Г. П. Александров</i> — Замечания к проекту стандарта „Правила испытания силовых трансформаторов“
<i>А. В. Донской</i> — Изучение режима работы индукционных бессердечниковых печей	47	<i>Библиография</i>
<i>И. А. Торопов</i> — Нагрев вихревыми токами металлических частей опорной конструкции индукционной печи	50	<i>Рефераты</i>
<i>Р. Л. Аронов</i> — Определение сопротивления для получения заданных условий работы	54	<i>На обложке</i> — П. Н. Яблочков, пионер русской электротехники. К юбилею журнала „Электричество“ (1880—1940).

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

8
1940

ЖУРНАЛ ОСНОВАН В 1880 Г.

АВГУСТ

ОРГАН НАРОДНОГО КОМИССАРИАТА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ, НАРОДНОГО КОМИССАРИАТА ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ И АКАДЕМИИ НАУК СССР

Адрес редакции: Москва, Бол. Калужская, дом 67, 1 этаж, комн. 144, тел. В 5-32-79

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

ДВИНУТЬ ВПЕРЕД РАЗВИТИЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОТЕРМИИ

Мощный рост социалистической промышленности за годы сталинских пятилеток вызвал необходимость создания новых производств и новых технологических процессов, широко использующих электронагрев. В черной и цветной металлургии, в химической промышленности, в машиностроении и металлообработке, в разных областях коммунального хозяйства и быта электропечи получили большое распространение. Этому содействовало в первую очередь широкое развитие электрификации СССР, обеспечившее внедрение электричества во все отрасли народного хозяйства.

Исключительно большое значение электротермические процессы и электропечи имеют для оборонных отраслей промышленности в третьей пятилетке, являющейся пятилеткой химии и качественной стали.

Советский парк электропечей обладает установленной мощностью около 1 миллиона киловатт-мощностей. Расход электроэнергии для электротермических производств достигает в СССР нескольких миллионов киловатт-часов в год. Но эти, сами по себе большие, цифры являются недостаточными для Советского Союза. Потребление электроэнергии для целей промышленного электронагрева составляет в СССР менее 10% общего производства электроэнергии в стране, в то время как еще накануне второй империалистической войны расход электроэнергии для нужд электрометаллургии и электрохимии составлял в Швейцарии 34%, в Германии — более 20%, в Италии — около 20%, во Франции — 15%.

Реализация задач третьей пятилетки требует смелого и решительного внедрения электротермических методов в специальные технологии, что должно сочетаться с максимальной экономией электроэнергии.

Области применения промышленного электронагрева должны быть значительно расширены.

Так например, более широкое распространение должна получить выплавка электростали дуплекс-процессом, при котором металл расплавляется обычно в мартеновской печи, а перед разливкой выдается для подогрева в электропечь, что содей-

ствует повышению однородности и других качеств металла.

В области цветной металлургии совершенно необходимым является осуществление в промышленном масштабе электротермического производства силумина (сплава алюминия с кремнием), обладающего высокими литейными и антикоррозийными свойствами, электротермического производства никеля из бедных руд, а также еще большее внедрение электротермии в производство цветных и легких металлов.

Подобные же задачи — по расширению применения электронагрева — стоят перед химической, машиностроительной и металлообрабатывающей промышленностью.

Серьезное внимание должно быть обращено на создание производственной базы электропечестроения, современное состояние которой не соответствует запросам народного хозяйства и уровню мировой техники электротермии.

Советская электротермия уже не может базироваться на импорте электропечей, который достигал за последнее время нескольких миллионов рублей в год.

Не может быть далее терпимо такое положение, когда продукция имеющихся на заводах «Электрик» в Ленинграде и «Уралэлектромашина» в Свердловске цехов электропечей вытесняется основной номенклатурой этих заводов.

Нельзя мириться с тем, что конструкторские бюро и лаборатории этих заводов ввиду своей технической слабости не обеспечивают потребностей развития цехов электропечей.

Производство дуговых электросталеплавильных печей в Советском Союзе в последние годы значительно возросло и освободило страну от импорта, но все же оно не обеспечивает в достаточной мере потребностей промышленности. Вместе с тем поставляемые заводом «Уралэлектромашина» дуговые печи еще не удовлетворяют в качественном отношении требованиям металлургической промышленности и уровню современной техники электропечестроения.

Выпуск технически несовершенных дуговых электроплавильных печей затрудняет получение высоких технико-экономических показателей и приводит к значительному перерасходу электроэнергии и к снижению производительности при эксплуатации установок.

Ввиду того что электрорудные термические процессы в третьей пятилетке получают дальнейшее расширение, должно быть развернуто, в необходимых размерах, производство рудно-термических электропечей.

Индукционные плавильные печи завоевали прочное место в промышленности СССР. Заводами электропромышленности эти печи вполне освоены и выпускаются емкостью до 4 т; освоено также необходимое к ним оборудование. Поверхностный электронагрев также начинает получать широкое применение во всех отраслях промышленности. Развитие этого новейшего достижения техники и внедрение его в промышленность является неотложной задачей.

Наряду с этим следует отметить крайне значительный объем производства индукционных печей, что вызывает импорт их из-за границы, а также недостаточное развитие производства электрооборудования для индукционных печей и установок поверхностной электрозакалки.

Таким образом одной из важнейших задач наркомата электропромышленности СССР является создание производственной базы электропечестроения, для чего необходимо: закрепить и увеличить производство электропечей на заводах «Электрик» и «Уралэлектромашина» и усилить на этих заводах конструкторские бюро и лаборатории; форсировать проектирование и строительство нового электропечного завода; разработать типизацию и провести стандартизацию электропечей.

Далее, необходимо поставить на должную высоту производство специальных материалов для электропечестроения.

В особо неудовлетворительном состоянии находится производство графитированных электродов для дуговых электропечей и высокоомных сплавов для электропечей сопротивления.

Почти все современные дуговые сталеплавильные электропечи за границей работают не на угольных, а на графитовых электродах, обеспечивающих более высокую производительность и более высокое качество работы электропечей. Наша электродная промышленность отстает от этих запросов электротермии и лимитирует развитие производства специальных сортов стали, в частности нержавеющей стали.

Не лучше обстоит дело и с основными материалами для электропечей сопротивления: качество хромоникелевых сплавов и, в особенности, безникелевых сплавов сопротивления (фехраль, хромаль) не может быть признано достаточно удовлетворительным. Производство литых и профилированных нагревательных элементов, а также запасных элементов для электропечей сопротивления у нас не поставлено. Наркомат черной металлургии СССР не уделяет этому делу необходимого внимания.

Для того чтобы двинуть вперед дальнейшее развитие промышленной электротермии в нашей стране, необходимо обеспечить электропечестроение высококачественными материалами: графитированными электродами, высокоомными хромоникелевыми и безникелевыми сплавами сопротивления, литыми и профилированными нагревательными эле-

ментами, запасными частями, легковесным огнеупором, алундовыми изоляторами, жароупорными теплоустойчивыми сталями, льняной конденсаторной бумагой и рулонной алюминиевой фольгой (для статических конденсаторов всей группы индукционных электропечей).

Электрические печи требуют для своей эффективной работы высокого уровня автоматизации. К сожалению, следует отметить, что ни Наркомат электропромышленности СССР, ни Харьковский электромеханический завод, в частности, не занимаются по-настоящему вопросами автоматического регулирования дуговых печей, которое подчас упрощенно трактуется, как автоматическое передвижение электродов.

Автоматическая регулировка электропечи по системе ХЭМЗ не обеспечивает нужной величины средневзвешенного косинуса φ . Между тем совершенно необходимо сочетать задачи автоматизации регулировки с оптимальным электрическим режимом работы электропечи и высоким средневзвешенным косинусом φ , а также добиться автоматического зажигания и автоматического включения печи.

Перед приборостроительной промышленностью стоит задача — полностью обеспечить потребность электротермии в приборах и автоматических регуляторах для регулирования работы электропечей в программных регуляторах, электроконтактах, терморегуляторах и т. п. Производство некоторых из этих приборов должно быть поставлено заново, так как они до сих пор у нас вовсе не изготавливаются.

Многие вопросы теории и практики промышленной электротермии, связанные с поставленными выше задачами, должны быть включены в программу широкой научно-исследовательской работы, которую необходимо развернуть и возглавить руководством со стороны Академии наук СССР.

Все растущая и усложняющаяся техника промышленной электротермии требует большого количества инженеров и научных работников, которые должны готовить наши вузы. Подготовка кадров для электротермии должна быть организована впервые очередь в Ленинградском индустриальном институте, в Московском энергетическом институте им. Молотова и в некоторых других вузах, целесообразно было бы всячески развивать специальность по электрическим печам.

Широко должна быть развернута во всех отраслях промышленности подготовка техников и мастеров по электрометаллургическим, электрохимическим процессам и электропечному оборудованию.

Все вышеизложенные вопросы были выдвинуты и освещены в материалах Всесоюзной конференции по электротермии и электропечам, созывавшейся еще в марте текущего года Академией наук СССР и систематизировавшей большой и разносторонний научно-технический опыт электротермических цехов и лабораторий многих отраслей промышленности. Однако этот систематизированный ценный опыт не стал еще полностью достоянием заводских институтов и лабораторий, и результаты работ по электротермии и электропечам внедрены в практику.

Народное хозяйство и оборона страны настоятельно требуют проведения мероприятий, направленных к созданию мощной и технически оснащенной промышленной электротермии, что может быть достигнуто объединенными усилиями электриков и металлургов СССР.

Состояние и задачи техники советского релестроения

Г. Ф. ЭДЕЛЬШТЕЙН

Харьковский электромеханический завод им. Сталина

До 1933 г. в СССР не было сколько-нибудь серьезной производственной базы реле для электросиловых установок. Выпускавшиеся в то время заводом ХЭМЗ несколько примитивных типов реле совершенно не удовлетворяли потребностям быстро растущего энергетического хозяйства Союза, которому, соответственно его техническому уровню, нужны были значительно более совершенные типы. Было огромная диспропорция между техническим уровнем производства реле и уровнем энергетики Союза. Неотложнейшей задачей являлось техническое перевооружение производственной базы релестроения.

Такое перевооружение и было произведено в 1933 г. На заводе ХЭМЗ для производства реле был выделен отдельный цех, который был полностью реконструирован.

В целях возможно более быстрого удовлетворения спроса на реле была принята, по нашему мнению, единственно правильная тогда, линия на максимальное использование мирового технического опыта.

Уже к началу 1935 г. был налажен выпуск довольно разнообразной номенклатуры реле защиты и автоматики, что дало возможность почти полностью прекратить импорт этих аппаратов.

С 1935 г. начинается новый этап в развитии советского релестроения. Если до этого времени основной задачей коллектива релейщиков завода было внедрить в производство возможно большее число необходимых народному хозяйству типов реле, то решив, в основном, эту задачу, мы начали критически оценивать иностранный опыт и искать свои собственные пути.

Не случайно поэтому, что именно после 1935 г. на заводе серьезно разворачивается творческая работа коллектива релейщиков и создаются новые и при этом зачастую оригинальные конструкции реле. В результате этой работы уже в 1939 г. в производстве почти не остается ни одного из типов реле индукционной серии, внедренной ранее. Она полностью заменена новой более добротной и техниче-ски более совершенной. Вводится в производство ряд совершенно новых типов реле защиты и автоматики.

Состояние производства реле в настоящее время таково, что освоенная номенклатура реле защиты и автоматики (138 типов и 622 исполнения) дает возможность защитить многочисленные объекты энергетических систем и автоматизировать целый ряд процессов в энергетике и других областях народного хозяйства Союза.

Используя освоенную заводом номенклатуру защитных реле, можно осуществить: полную защиту генераторов при внутренних повреждениях и перекрузках; полную защиту 2- и 3-обмоточных трансформаторов (при этом имеется возможность осуществить как быстродействующую, так и замедленную дифференциальную защиту); полную защиту электродвигателей при внутренних повреждениях и перекрузках; полную защиту линий и сетей различной конфигурации при междупазных замыканиях и замыканиях на землю.

Освоенная заводом номенклатура реле автоматики

и автоматического регулирования позволяет осуществить: автоматическую синхронизацию генераторов с постоянным углом или с постоянным временем опережения; автоматическое повторное включение; автоматическое регулирование напряжения, тока, мощности, скорости; контроль числа оборотов, направления вращения, давления газов и жидкости, скорости протекания жидкости; различные схемы автоматической сигнализации.

В номенклатуре завода имеется большая группа механических и электромеханических реле времени, позволяющих получить выдержки времени от 0,25 сек до 30 min.

На работе по созданию всей этой номенклатуры выросли квалифицированные кадры конструкторов и исследователей: тт. Ступель, Штрафун, Тулин, Бреслер, Плешко и др.

Было бы, понятно, совершенно неправильным делать вывод, что техника релестроения удовлетворяет уже сегодня полностью требованиям народного хозяйства СССР.

Наоборот, советское релестроение не догнало еще уровня технического развития энергетики и в целом ряде очень важных областей стоит гораздо ниже этого уровня.

В области защитных реле это в первую очередь относится к быстродействующим реле. Значение таких реле для нашей энергетики общеизвестно. Номенклатура защитных реле завода дает возможность осуществлять только балансную токовую быстродействующую защиту линий. Что касается быстродействующих направленных (в частности с высокочастотной блокировкой) и дистанционных защит, то завод делает сейчас только первые шаги в деле освоения необходимых для этого типов реле. Эта задача стоит перед заводом как одна из самых актуальных и неотложных и подлежит непременно-му решению в 1940 г.

Решение задачи — создать быстродействующие направленные и реактансные реле — завод стремится найти по линии применения индукционного принципа, так как такой путь дает возможность создать целую серию реле, что с точки зрения общности, а следовательно, и повторяемости в производстве деталей, чрезвычайно важно.

Что касается быстродействующих импедансных измерительных органов, то здесь по линии применения индукционного принципа завод удовлетворительного решения пока не нашел.

Мы думаем, что сможем решить эту задачу с помощью электронной техники, используя как работы завода в этой области, так и работы других организаций Союза и отдельных лиц (в частности, инженеров Воскресенских).

Внедрение в производство комплекта реле направленной защиты с высокочастотной блокировкой открывает перед заводом новые возможности. На базе реле этого комплекта можно будет разработать и внедрить ряд комплектов защиты других объектов энергетической системы, а главное, внедрение этих реле должно серьезно подтянуть уровень технологии производства, пока еще довольно низкий.

Нам кажется, что после решения этой основной задачи техплана 1940 г. и конструктивного улучшения ряда массовых типов реле, уже освоенных производством, советское релестроение в части защитных реле будет находиться на уровне требований народного хозяйства и соответствовать современному уровню релейной техники.

Если в области защитной релейной техники завод достаточно ясно представляет себе пути развития и более или менее хорошо знает требования народного хозяйства Союза, то в области реле автоматики и автоматического регулирования такой ясности у завода нет.

Определяется это, с одной стороны, тем, что проектные научно-исследовательские организации и потребители не выработали еще четкой номенклатуры реле автоматики, нет еще грамотных технических условий на ряд устройств, и, с другой стороны, тем, что нет ясности в отношении специализации электромашиностроительных заводов Союза в области аппаратуры автоматики.

Возможно, что решения этого комплекса вопросов в полной мере сегодня еще нельзя требовать, учитывая, что область автоматики начала широко развиваться только в последнее время.

Нам кажется однако, что и при существующем положении руководящие органы союзной электропромышленности могли бы значительно более точно определить нужное для народного хозяйства направление работы завода, ликвидировав имеющийся сейчас зачастую совершенно ненужный и излишний параллелизм в работе заводов и других организаций в области автоматики. Для этого нужно, чтобы технический совет наркомата электропромышленности СССР не от случая к случаю, а систематиче-

ски направлял бы работу по автоматике, определял специализацию своих заводов. Нужно, чтобы заводы в рамках своей специализации получали бы основанные (работами исследовательских институтов и опытом эксплуатации) технические условия.

Ликвидировать указанное положение можно и сейчас скорее, чем когда-либо раньше, так как электропромышленность подчинена теперь одному наркомату.

Нам кажется, что наркомат электропромышленности должен в ближайшее время рассмотреть также вопрос о местоположении релейного производства с точки зрения его технологической общности с другими производствами завода ХЭМЗ.

Серьезным тормозом в развитии техники советского релестроения является отсутствие в Союзе производства в заводском масштабе ряда крайне необходимых новых материалов. Это в первую очередь касается таких материалов, как гайперит, угольные диски и шайбы, провод с кембриковой изоляцией, различные профили железа армко и без которых немислимо, например, уже сейчас развитие номенклатуры угольных регуляторов, реле повышенной чувствительности и др.

За годы сталинских пятилеток создана производственная база (пока единственная в Союзе) советского релестроения, освоена большая номенклатура реле защиты и автоматики, а главное, на заводе выросли квалифицированные кадры релейщиков, достаточно хорошо понимающих стоящие перед ними задачи и готовых и дальше бороться за создание новых, надежных, нужных нашей стране реле.

Необходимо, чтобы этому коллективу были оказаны и большее внимание, и большая помощь

Новые задачи промышленности электроизоляционных материалов

В. С. КВАШНИН

Москва

В мае с. г. в Москве происходило расширенное совещание по электроизоляционным материалам, организованное Московским отделением Всесоюзного научного инженерно-технического общества энергетики и электросвязи совместно с Всесоюзным электротехническим институтом (ВЭИ) и отраслевым бюро технической информации Главэлектромашинопрома НКЭП.

Совещанием были заслушаны и обсуждены некоторые общие вопросы: о новейших достижениях электроизоляционной техники и наших задачах (докл. Б. М. Тареев), о состоянии научно-исследовательских работ по электрической изоляции в сильноточной электропромышленности (докл. Ю. В. Коричинский) и о производственной базе по выпуску электроизоляционных материалов (докл. В. С. Квашнин), а также ряд специальных докладов по отдельным видам электроизолирующих материалов: сжатый газ, как высоковольтная изоляция (докл. Б. М. Вул), новые типы электроизоляционных лаков, эмалей, паст и компаундов (докл. К. А. Андрианов и В. И. Калитвянский), электроизоляционные нефтяные масла и их заменители (докл. А. К. Варденбург), качество электроизоляционных бумаг и пути его

улучшения (докл. Б. Г. Милов), пути усовершенствования волокнисто-бакелитовой слоистой изоляции (докл. И. А. Ярославский), использование слюды для изоляции электрических машин и сырьевые сурсы по слюде (докл. А. В. Трабский и Е. Я. Лубчин).

Кроме того, были заслушаны доклады представителей организаций, эксплуатирующих электрооборудование, о требованиях к качеству изоляции электрических машин и аппаратов (докл. С. И. Лейтис и М. И. Трехов).

Большой интерес, проявленный к совещанию со стороны работников электроизоляционной промышленности различных организаций, привлек к участию в работах свыше 200 чел. Кроме представителей заводов электропромышленности, в работах совещания приняли участие сотрудники научных организаций различных отраслей промышленности и институты Академии наук СССР, представители смежных отраслей, являющихся поставщиками сырья, полуфабрикатов и готовых изделий для электроизоляции и др.

В журнале «Электричество» № 4 за 1940 г. были предварительно помещены статьи на темы

новых докладов, поставленных на данном совещании. Краткое изложение сущности некоторых других докладов, а также основных выступлений по докладам приводится в настоящей статье.

Б. Г. Милов в докладе «Качество электроизоляционных бумаг и картонов и пути его улучшения» привел ряд примеров достижений мировой техники в производстве электроизоляционных бумаг за последние годы и проанализировал существующее положение на этом участке в нашей бумажной промышленности.

Отдельные иофирмы подвергают целлюлозу, предназначенную для высоковольтных кабельных бумаг, дополнительной химической обработке и промывке чистой водой. Целлюлоза при этом получается исключительно однородной, что иллюстрируется характером набухания волокон в медно-аммиачном растворе. Бумага, изготовленная из дополнительно обработанной целлюлозы, содержит незначительное количество водорастворимых солей, снижающих электрические характеристики бумаг.

Конденсаторные бумаги вырабатываются толщиной 6—7 μ с содержанием золы 0,05—0,07%.

Отдельные марки целлюлозы для электроизоляционных бумаг отличаются исключительной чистотой и имеют содержание сернистых соединений в пересчете на серу 0,0016% (марка «прима-крафт»).

Применяются более усовершенствованные методы испытания целлюлозы и бумаг: диаграммы механической прочности в зависимости от степени размола, проводимость водного экстракта и др. Специализируется оборудование для производства изоляционных бумаг и картонов.

Наша бумажная промышленность имеет определенные достижения в освоении производства новых марок электрокартонов, конденсаторной сульфатцеллюлозной бумаги и др. Наряду с этим наши электрокартоны часто недостаточно однородны по толщине, отличаются пониженной механической прочностью в поперечном направлении. Большим недостатком кабельных бумаг является повышенное содержание в них электролитов. Для устранения этого недостатка требуется специальное химическое обессоливание воды. Конденсаторные бумаги не отличаются требуемой чистотой (наличие костры, известковых вкраплений и пр.). Малинская фабрика недостаточно оснащена специальным оборудованием. Успешные результаты опытных выработок конденсаторной бумаги толщиной 6—8 μ должны быть закреплены в производстве. Разработанный способ получения длинноволокнистой бумаги для микаленты не внедрен до настоящего времени в производство.

Для улучшения качества наших бумаг и картонов должен быть разработан новый стандарт на высококачественные изоляционные целлюлозы, определены и внедрены наилучшие режимы дополнительной химической обработки целлюлозы. Следует развивать большую специализацию соответствующих производств, с оснащением их современным оборудованием, добиваясь улучшения качества производственной воды. Должны быть усилены научно-исследовательские работы по улучшению качества сырья, изучению влияния состава целлюлозы на ее свойства, изучению и стандартизации технологических процессов.

Исключительно большое значение в изоляции электрических машин имеет слюда. Вопросам наиболее рационального использования слюды в электромашиностроении и сырьевым ресурсам по слюде

были посвящены доклады А. В. Трабского и Е. Я. Голубчина. Производство слюдяной изоляции недостаточно оснащено оборудованием и весьма слабо механизировано. Различные заводы часто применяют различные технологические процессы. Отсутствуют единые нормы применяемости слюды для различных видов слюдяной изоляции. Все это часто приводит к нерациональному расходованию слюды, а иногда и к снижению качества изоляции.

Весьма существенным является вопрос максимального использования слюды меньших размеров и пониженной сортности. Актуальное значение имеют работы по замене слюды флогопит-мусковитом в связи с уменьшением добычи флогопита. Работы эти показали полную возможность такой замены для коллекторных, прокладочных, формовочных и части гибких миканитов. Наибольшую трудность замены флогопита представляет в маслослойных гибких миканитах и микафолии.

Уменьшение дефицита слюды может быть достигнуто использованием регенерированной слюды из отходов миканитовой изоляции. Для изоляции обмоток электрических машин напряжением до 3300 В вместо микафолии и миканита может быть применена черная лакоткань. Это подтверждается в частности опытом американских фирм. В тех случаях, когда к изоляционному материалу класса В не предъявляется высоких требований в отношении электрических характеристик и влагостойкости, слюдяные материалы (прокладочный, формовочный, коллекторный миканиты) могут быть заменены асбестовыми композициями (асбест-бакелит, асбест-глифтал и др.).

Качество поставляемых расщипанных слюд за последние годы значительно снизилось: имеет место большая неравномерность по толщине, наличие большого количества краевых дефектов и трещин в пластинках слюды. Весьма важным является увеличение выпуска тонкорасщипанных слюд (толщиной 0,015 mm), применение которых позволяет увеличить электрическую прочность изоляции.

Состояние сырьевой базы слюдяных месторождений требует резкого улучшения. Действующие разработки слюды имеют совершенно недостаточную техническую оснащенность. Большинство операций при горных работах производится малопроизводительным ручным трудом. Геологоразведочные работы по изучению и подготовке новых месторождений слюды производятся в недостаточном объеме. Обработка слюды также в основном производится вручную с помощью весьма примитивных инструментов. Требуется проведение больших работ по механизации труда в слюдяной промышленности по расширению геологических разведок новых слюдяных месторождений.

Докладчики С. И. Лезнов и М. И. Трехов привели многочисленные конкретные примеры различных условий работы отдельных видов электрооборудования и данные о сроке службы изоляции в зависимости от этих условий. Ряд примеров свидетельствует о наличии случаев недостаточно тщательного и аккуратного наложения изоляции и сборки электрических машин на наших электромашиностроительных заводах, что влечет за собой преждевременное разрушение изоляции и выход электрооборудования из строя. Такие случаи были отмечены, в частности, на генераторах завода «Электросила», где имели место пробой изоляции обмотки статора на корпус вследствие механического повреждения изоляции при укладке обмотки. Недостаточная теп-

лостойкость, влагостойкость, маслостойкость и химическая стойкость изоляции часто также является причиной преждевременного выхода из строя электрооборудования.

Существенным недостатком многих типов наших электрических машин является то обстоятельство, что изоляция их не предусматривает специфичности условий работы этих машин и не приспособливается к заранее заданным конкретным условиям. Изоляция электродвигателей, работающих в металлообрабатывающих цехах, подвергается быстрому разрушению под воздействием металлической пыли, масла и эмульсии. В литейных и термических цехах изоляция электродвигателей подвергается сильным перегревам и как следствие ускоренному старению. Древесная пыль в деревообделочных цехах, смешиваясь с маслом или увлажняясь за счет водяных паров воздуха, превращается в липкую массу, которая весьма трудно удаляется с обмоток электродвигателей, если эти обмотки не имеют специальных прочных глянцевых покрытий электроизоляционными лаками. Наличие древесной пыли ухудшает теплоотдачу обмоток и приводит к перегреву изоляции последних.

К электропромышленности предъявляются большие требования со стороны потребителей электрооборудования, заинтересованных в улучшении качества изоляции электрических машин и аппаратов. Особо серьезного внимания заслуживают требования химической промышленности и военно-морского флота.

В процессе обсуждения поставленных докладов был сделан ряд весьма интересных дополнительных сообщений о работах по новым электроизоляционным материалам, проводимых в различных организациях.

Во Всесоюзном институте минерального сырья проводятся работы по получению искусственных пленок из бентонитовой глины (типа «alsifilm»). Полученные пленки полупрозрачны, гнутся, электрическая прочность их близка к прочности слюды. Однако пока еще пленки эти недостаточно прочны и отличаются хрупкостью. Не всегда удается получить пленку заданной толщины.

Н. В. Александров сообщил о проведенных в ВЭИ работах по применению неорганических веществ для клейки миканитов (эмаль-миканит). Применение эмаль-миканита для лаковой изоляции позволяет значительно сократить габариты и увеличить надежность работы электрической машины. Эмаль-миканит обладает вдвое большей теплопроводностью по сравнению с обычным миканитом.

Ввиду сложности технологического процесса изготовления эмаль-миканит в настоящее время может быть применен лишь в ограниченных случаях. Необходимо вести работу по упрощению технологии

изготовления эмаль-миканита и его удешевления с тем, чтобы можно было применять этот материал и в нормальных асинхронных двигателях.

В. Т. Ренне (Ленинградский индустриальный институт) сделал сообщение о работах по получению отечественного материала типа «опалвакс», названного «олеоваксом», представляющего собой продукт гидрогенизации касторового масла. Олеовакс имеет весьма высокую диэлектрическую проницаемость (10—20). Применение олеовакса для пропитки телефонных конденсаторов взамен парафина позволяет увеличить вдвое емкость конденсаторов при тех же габаритах или уменьшить габариты при сохранении емкости. К недостаткам олеовакса относится повышенное значение $\tan \delta$.

Касаясь общих вопросов развития электроизоляционной техники и производственной базы по электроизолирующим материалам ряд участников совещания, — член-корреспондент Академии наук СССР проф. **А. Ф. Вальтер**, **В. И. Калитвянский** (ХЭМЗ), **Л. А. Эпштейн** (завод АТЭ-1) и др. решительно высказались за необходимость возобновления работ существовавшего ранее бюро по электрической изоляции. Создание такого бюро при наркомате электропромышленности СССР должно обеспечить наилучшую координацию и направление работ всего большого количества предприятий и организаций работающих по электрической изоляции и входящих в систему различных наркоматов.

В. Т. Ренне остановился на проблеме кадров специалистов электроизоляционного дела. Если подготовка инженеров-электриков в области электроизоляционной техники в какой-то мере производится в ЛИИ и МЭИ, то вопрос о подготовке инженеров-химиков в этой же области до настоящего времени не решен. Необходимо уделить больше внимания этим важнейшим вопросам.

В. И. Калитвянский (ХЭМЗ), ссылаясь на работы ХЭМЗ и американские данные, выдвинул вопрос пересмотре в сторону повышения существующих норм перегревов обмоток электрических машин зависимости от режимов работы и реальной загрузки этих машин. Испытания ХЭМЗ показали, что, например, для машины, рассчитанной на работу при температуре 110° в течение 10 лет, при фактическом нахождении ее под режимом нагрузки в общей сложности 2 года, могут быть допущены значительно более высокие температуры, т. е. может быть повышено использование мощности машины.

В принятых резолюциях совещание, отметив некоторые достижения в электроизоляционной технике СССР за последние годы, указало на имеющееся большое отставание в ее развитии и сформулировало важнейшие задачи заводов электропромышленности, смежных производств, вузов и научно-исследовательских институтов в области электроизоляционных материалов.

Вопросы устройства и эксплуатации заземлений при всей их важности для различных отраслей народного хозяйства до сих пор являются недостаточно изученными. В утвержденных недавно «Правилах технической эксплуатации электрических станций и сетей» вопросам заземлений посвящена двадцать первая глава. Эта глава предусматривает наличие специальных подробно разработанных правил устройства заземлений. Однако следует отметить, что затянувшаяся в течение длительного времени разработка проекта новых правил устройства заземлений не сопровождалась их широким обсуждением, что не способствовало внесению ясности в многие спорные вопросы.

Ниже помещаются: двадцать первая глава «Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей» и статьи инж. А. И. Лурье «Искусственное повышение проводимости заземляющих устройств», инж. А. С. Грамматчикова «О новых правилах устройства заземлений» инж. В. П. Тихонова «Использование металлических конструкций здания, как заземления и рабочего нулевого провода», освещающие ряд актуальных вопросов устройства и эксплуатации заземлений.

В одном из номеров 1940 г. редакция имеет в виду поместить подготовляемую к печати статью об основных положениях проекта новых правил устройства заземлений.

РЕДАКЦИЯ

Из „Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей“

Заземление

Общие положения

§ 699. Электрические устройства и части оборудования, которые могут оказаться под напряжением вследствие нарушения изоляции, должны иметь защитные заземляющие устройства, выполненные в соответствии с правилами устройства заземлений.

§ 700. Защитному заземлению на электрических станциях и подстанциях подлежат следующие части электрической установки:

- а) станины, кожухи электрических машин, трансформаторов, выключателей и других аппаратов, са- лезки электродвигателей;
- б) приводы электрической аппаратуры;
- в) вторичные обмотки трансформаторов тока и на- пряжения, кроме случаев, предусмотренных в «Ру- ководящих указаниях по релейной защите»;
- г) каркасы распределительных щитов и щитов управления;
- д) арматура изоляторов закрытых и открытых распределительных устройств;
- е) металлические конструкции открытых подстан- ций, корпуса кабельных муфт, металлические обо- лочки кабелей и проводов.

§ 701. Рельсовые пути, находящиеся на террито- рии электрических станций или подстанций, не за- земляются. В местах выхода рельсовых путей за контур заземления должны устраиваться изолирую- щие стыжки.

§ 702. В качестве заземлителей должны быть использованы специально сооружаемые искусствен- ные заземлители и подземные водопроводные сети (естественные заземлители).

§ 703. При использовании естественных заземли- телей должны быть обеспечены:

- а) полная безопасность эксплуатации водопровод- ной сети;
- б) надежное присоединение заземлителей, обеспе- чивающее их расчетное сопротивление при всех экс-

платационных условиях и при ремонтных работах.

§ 704. При использовании водопроводной сети в качестве естественного заземлителя водопроводная сеть должна быть надежно заземлена у потребите- лей или должны быть приняты иные защитные ме- ры, предотвращающие вынос потенциалов (изоляция фланцевых соединений и т. д.).

§ 705. Величина сопротивления заземления дол- жна обеспечивать в любое время года нормами на- пряжения прикосновения и шаговые напряжения при прохождении через заземление расчетного тока однополюсного замыкания на землю.

§ 706. Защитное заземление, выполненное об- щим для нескольких систем напряжений, должно удовлетворять требуемым напряжениям прикоснове- ния и шага для всех присоединенных установок при расчетных токах любой из них.

§ 707. Заземляющие (провода и полюсы, проло- женные в помещениях, должны быть доступны для осмотра и предохранены от механических и хими- ческих повреждений.

§ 708. Открыто проложенные провода и полюсы защитных заземлений должны быть окрашены в черный цвет, а заземленные нулевые провода — в фиолетовый с черными полосками.

§ 709. В сетях напряжением до 1000 в, в кото- рых применено зануление (присоединение корпусов токоприемников к заземленному нулевому проводу) или в которых имеется неизолированный нулевой провод, доступный для прикосновения, применения защитных заземлений без одновременного присое- единения к нулевому проводу (без зануления) не до- пускается.

§ 710. Соединения заземляющей проводки долж- ны обеспечивать надежный контакт. Присоединение заземляющих проводов к корпусам аппаратов, машин и т. д. должно осуществляться надежными болто- выми соединениями или сваркой.

Присоединения заземляющих проводов к заземлителям и все прочие соединения заземляющей проводки должны осуществляться сваркой.

§ 711. От каждого заземляемого элемента должен идти отдельный заземляющий провод непосредственно к заземлению или к сборной заземляющей полосе, соединенной с заземлителем.

Последовательное включение в заземляющий провод нескольких заземляющих частей установки запрещается.

§ 712. По условиям механической прочности и удобства соединений все заземляющие проводники

должны быть при круглом сечении не меньше 6 при меди, 12 мм² при железе, а при прямоугольном соответственно 20 и 24 мм². При проводниках в виде ленты необходимо иметь толщину последней не менее 3 при надземной прокладке и не менее 4 при подземной прокладке.

Заземляющие проводники, проложенные под злеями и недоступные для наблюдения, должны иметь сечение для меди не менее 25 мм², а для железа не менее 48 мм². Сечения заземляющих проводов должны быть достаточны в отношении механической устойчивости.

Эксплуатация заземляющих устройств

§ 713. При приемке заземляющего устройства должны быть предъявлены:

- а) утвержденные проекты;
- б) исполнительные чертежи и схемы заземляющего устройства;
- в) акт на подземные работы по укладке заземлений;
- г) протоколы испытаний заземлений.

§ 714. Для проверки состояния заземлений должны проводиться следующие испытания и осмотры:

- а) измерение сопротивлений заземления;
- б) проверка состояния наружной части заземляющей проводки;
- в) снятие кривых распределения потенциалов на подходах, определение напряжения прикосновения и шага;
- г) проверка состояния устройств, предотвращающих вынос опасного потенциала за пределы контура заземления, а также внесение потенциала в пределы заземляющего контура.

§ 715. Испытания заземления должны производиться методами, предусмотренными типовой «Инструкцией по проверке заземляющих устройств в установках высокого напряжения».

§ 716. На электрических станциях и подстанциях измерения сопротивлений заземления, проверка потенциалов и проверка состояния наружной части заземляющей проводки должны производиться не реже одного раза в год.

§ 717. На линиях передачи высокого напряжения измерения сопротивления заземления опор и отдельно стоящих молниеотводов должны производиться один раз в два года.

На участках линий передач с металлическими опорами, проходящими в населенных местах, должны определяться также напряжения прикосновения и шага.

§ 718. Испытания заземляющих устройств должны производиться в периоды наименьшей проводимости почвы: летом при наибольшем просыхании или зимой при наибольшем промерзании почвы.

§ 719. Помимо полных испытаний и осмотров заземлений должны производиться:

- а) проверка надежности присоединения зазем-

ленного оборудования после каждого ремонта этого оборудования;

б) проверка надежности присоединения временных заземлителей после каждого ремонта заземлителей;

в) проверка состояния пробивных предохранителей в сетях напряжением до 1000 в — ежемесячно при наличии предположения о срабатывании их.

§ 720. Результаты испытаний и осмотров заземлений должны оформляться актами.

§ 721. В установках с незаземленной нейтралью или нейтралью, заземленной через большое сопротивление, обслуживающий персонал обязан немедленно по обнаружении замыкания на землю приступить к отысканию возникшего замыкания и обеспечить его устранение в соответствии с инструкцией по отысканию замыкания на землю.

В таких установках должны быть установлены приборы для контроля изоляции с соответствующей световой и звуковой сигнализацией.

§ 722. В качестве временных заземлений должны применяться специальные переносные заземляющие на расчетный ток замыкания на землю. Сечением проводников должны быть не менее 25 мм² (медь).

§ 723. Устройство временных заземлений и коротковолновое должно производиться надежно и с соблюдением мер предосторожности, предусмотренных правилами по технике безопасности.

§ 724. Каждое заземление, находящееся в эксплуатации, должно иметь паспорт, содержащий:

- а) основные технические данные заземления;
- б) основные расчетные величины: сопротивление заземлению, расчетные токи, наибольшие напряжения прикосновения и шага с указанием объекта участка, к которым они относятся;
- в) результаты осмотров и испытаний при приеме заземлений в эксплуатацию с указанием результатов измерений и атмосферных условий при производстве испытаний и в период, предшествующий испытаниям;
- г) результат осмотра и испытаний заземления в процессе эксплуатации;
- д) изменения требований к заземлениям и изменения расчетных величин;
- е) изменения, внесенные в устройства заземления в результате произведенных ремонтов и пр.

Искусственное повышение проводимости заземляющих устройств

А. И. ЛУРЬЕ

Ленинградский индустриальный институт

Практика показывает, что обеспечить безопасность и надежность электрических установок высокого напряжения, расположенных на грунтах с удельным сопротивлением больше $5 \cdot 10^4 \Omega \text{ см}$ (на песках, на скале) при помощи заземлений обычного типа, как правило, не удается. В этом случае приходится прибегать:

а) К глубинным заземлителям — заземлителям, расположенным в зоне грунтовых вод.

б) К выносным заземлителям — заземлителям, расположенным на участках с хорошо проводящим грунтом, находящимся на более или менее значительном расстоянии от защищаемой установки (в близлежащем болотце и т. п.).

в) К заземлителям с искусственно повышенной проводимостью, у которых в грунт, окружающий заземляющие электроды, искусственно введены влага и соли.

Первые два типа «необычных» заземлителей могут быть применены далеко не всегда, и их устройство зачастую связано с весьма большими техническими и экономическими трудностями, в то время как искусственная обработка грунта солями никаких существенных затруднений не вызывает.

Однако в большинстве случаев пригодными для практики могут быть признаны далеко не все способы обработки грунта, а только те, которые обеспечивают повышение проводимости заземляющего устройства по крайней мере в 10 раз и которые гарантируют сохранение такого повышения проводимости в течение не менее 3—5 лет.

Искусственная обработка грунтов в целях повышения проводимости заземляющих устройств применяется уже давно. В настоящее время существует ряд самых разнообразных способов такой обработки. Из них наибольшее распространение получили способы, основанные: на введении в грунт раствора соли; на введении в грунт соли в твердом виде; на введении в грунт относительно хорошо проводящих нерастворимых веществ (кокс, древесный уголь), не смешанных или смешанных с солью. Устройство заземлений этими способами показано на рис. 1; а — обработка раствором соли. В грунт через отверстия в трубе одновременно вводятся 30—40 кг соли в виде насыщенного раствора; б — обработка твердой солью. В грунт у верхнего конца трубы закладывается около 40 кг соли, которая при укладке смачивается примерно 60 л воды; в — обработка смесью кокса с солью. В грунт у верхнего конца трубы закладывается около 1 м³ кокса, смешанного примерно с 30—40 кг соли.

Что касается эффективности этих способов обработки, то по этому вопросу существуют противоположные мнения — от утверждения, что эти способы пригодны почти во всех случаях, до утверждения, что они совершенно непригодны.

При этом последнее мнение обычно мотивируется тем, что заземлители с искусственно повышенной проводимостью, с одной стороны, якобы не поддаются даже самому приближенному расчету (как с точки зрения увеличения проводимости, так и с точки зрения продолжительности действия), и так как,

с другой стороны, они, якобы, приводят к быстрому разрушению заземляющих электродов вследствие усиленной коррозии.

Столь резкая противоречивость мнений, повидимому, объясняется тем, что авторы при разработке своих способов не учитывали физических свойств обрабатываемых грунтов и находящихся в них почвенно-грунтовых вод и подходили к решению задачи чисто эмпирически, а зачастую и просто интуитивно.

Критическое изучение многочисленных опытных данных показывает, что лучшие из существующих способов обработки грунтов могут повысить проводимость заземляющих устройств в 2—8 раз (большие цифры относятся к грунтам с большим удельным сопротивлением) и что продолжительность действия обработки может достигать двух-трехлетнего срока только в грунтах достаточно плотных (глине, суглинках), в то время как в рыхлых грунтах (например песках) она составляет всего лишь несколько месяцев. Поэтому существующие способы обработки для песчаных грунтов совершенно непригодны. А это, в свою очередь, приводит к тому, что значительное количество установок, расположенных на песчаных грунтах, фактически является и негрозоупорными, и небезопасными. Такое положение вещей настоятельно требует разработки нового способа, удовлетворяющего требованиям эксплуатации. Совершенно очевидно, что новый рациональный способ может быть разработан только на основе глубокого изучения и учета физических свойств грунтов и почвенно-грунтовых вод, так как последние и определяют электропроводность грунта, а в конечном итоге и проводимость заземляющего устройства.

Свойства грунтов. Нас особенно будут интересовать гидрологические свойства грунтов, т. е. способность их удерживать и пропускать через себя влагу.

На эти свойства прежде всего влияют механиче-

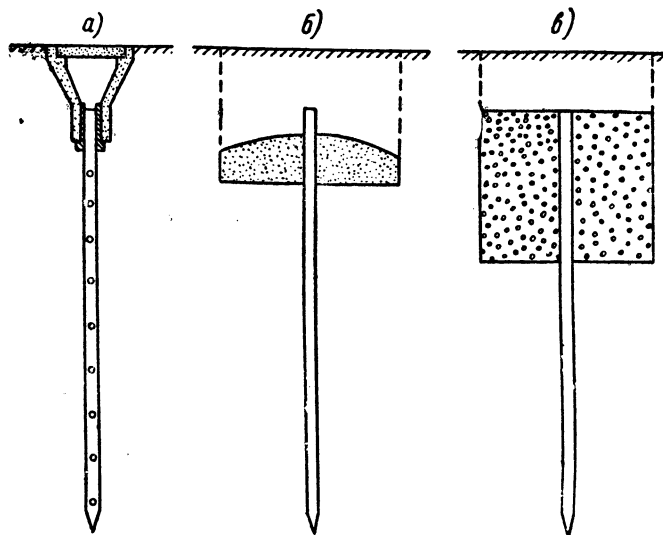


Рис. 1

ский, или, иначе говоря, гранулометрический состав грунта, его пористость и его водопроницаемость.

Под гранулометрическим составом грунта понимают процентное содержание в нем частиц различной крупности. От гранулометрического состава зависит суммарная поверхность частиц, находящихся в единице веса, которая в свою очередь определяет величину молекулярных сил, могущих удерживать влагу вокруг частиц грунта. От гранулометрического состава в значительной мере зависят также и пористость грунтов и их фильтрационные свойства. Ввиду этого в основу классификации грунтов положен именно его гранулометрический состав.

Следует различать классификацию частиц и классификацию грунтов.

Классификация частиц приведена в табл. 1.

Таблица 1

Наименование частиц	Размеры mm
Галька	100—60
Гравелистые	40—2
Песчаные	2—0,05
Пылеватые	0,05—0,005
Глинистые	<0,005

Сокращенная классификация грунтов приведена в табл. 2. Она в основном определяется содержанием в грунте глинистых частиц.

Таблица 2

Наименование грунта	Содержание глинистых частиц, %
Песчаный	До 3
Супесчаный	От 3 до 10
Суглинистый	" 10 " 20
Тяжелый суглинистый	" 20 " 30
Глинистый	>30

В табл. 3 приведены весьма характерные данные о поверхности частиц на один грамм веса.

Таблица 3

Наименование грунта	Удельная поверхность m ² /g
Песчаный	0,2
Супесчаный	6
Суглинистый	12
Тяжелый суглинистый	25
Глинистый	70

Пористость грунтов определяет количество влаги, которое может поместиться в грунте. Данные о пористости приведены в табл. 4.

Таблица 4

Наименование грунта	Пористость, %
Пески	35—40
Суглинки	45
Глина	50
Торф	80
Инфузорная земля	90

С точки зрения способности грунтов пропускать через себя воду их делят на водопроницаемые, и доупорные и полупроницаемые.

Водопроницаемость грунтов характеризуется коэффициентом фильтрации, под которым понимают скорость фильтрации при градиенте напора, равном единице. Коэффициент фильтрации определяется не только гранулометрическим составом грунта и его пористостью, но и формой и взаимным расположением пор, а также наличием в нем набухающих глинистых частиц.

От фильтрации следует отличать свободное просачивание, которое будет иметь место тогда, когда над грунтом нет свободной водной поверхности и когда не все поры между частицами заполнены водой. Скорость свободного просачивания примерно в 10—20 раз меньше скорости фильтрации при градиенте напора, равном единице.

В табл. 5 приведены данные о коэффициенте фильтрации и о скорости свободного просачивания для ряда грунтов. Эти данные частично заимствованы из литературы, а частично получены экспериментально.

Таблица 5

Наименование грунта	Коэффициент фильтрации, см/сут-ки	Скорость свободного просачивания см/сут-ки
Пески	5000—200	~100
Супески	~ 20	—
Суглинки	~ 5	~0,5
Глина	<0,1	—

Приведенные данные о грунтах показывают, что пески относятся к крупнозернистым грунтам, обладающим наименьшей удельной поверхностью и наибольшей водопроницаемостью, а глины, суглинки, черноземы — к мелкозернистым грунтам, обладающим большой удельной поверхностью и небольшой водопроницаемостью.

Свойства почвенно-грунтовых вод. Содержание влаги в грунте зависит от свойств грунта, количества выпадающих осадков, климатических условий рельефа местности и от времени года.

Влагу, содержащуюся в грунте, нельзя рассматривать как нечто однородное. Принято различать гигроскопическую, пленочную, капиллярную и гравитационную воду.

Под *гигроскопической влагой* понимаются молекулы воды, примыкающие непосредственно к частям грунта. Когда эти молекулы образуют сплошной одномолекулярный слой, то говорят, что влажность грунта равна максимальной гигроскопической.

Гигроскопическая влага может поглощаться грунтом непосредственно из воздуха силами молекулярного притяжения. Сила притяжения гигроскопической влаги к частицам грунта столь велика, что она может передвигаться только в парообразном состоянии.

Под *пленочной водой* понимается влага, образующая относительно тонкую пленку поверх гигроскопической воды, удерживаемая на грунте теми же силами молекулярного притяжения. Эти силы меньше, чем для гигроскопической воды, но все же несравненно больше силы тяжести.

Силы молекулярного притяжения могут удерживать вокруг частиц грунта водяную пленку тол-

определенной толщины, одинаковой для всех грунтов. Когда водяная пленка достигает наибольшей возможной толщины, говорят, что влажность грунта равна максимальной молекулярной влагоемкости, данные о которой приведены в табл. 6.

Таблица 6

Наименование грунта	Максимальная молекулярная влагоемкость %
Пески	2—3
Супески	5—8
Суглинки	8—16
Тяжелые суглинки	16—25
Глина	25—40

Пленочная вода может передвигаться и в жидком виде, но только под влиянием молекулярных сил. Пленочная вода будет передвигаться из слоев, где толщина пленки больше, к слоям, где она меньше, вне зависимости от влажности грунта. Передвижение будет происходить до тех пор, пока толщина пленок не выравняется.

Скорость передвижения пленочной воды зависит от плотности грунтов, от их влажности и от направления передвижения, но во всяком случае она значительно меньше, чем передвижение при свободном просачивании (от десятых до сотых тысяч долей мм/сутки).

Под капиллярной водой понимают влагу, которая вследствие наличия в грунте тонких пор-капилляров поднимается с зеркала грунтовых вод в грунт на ту или иную высоту. Чем мелкозернистее грунт, тем больше высота капиллярного подъема.

Для песков она составляет 20—30 см, для суглинков — от 80 до 2 м, а для тяжелых глин до 10 м. Следует отметить, что под влиянием солей высота капиллярного подъема уменьшается.

Под гравитационной водой понимается влага, которая не может удерживаться в грунте силами молекулярного притяжения, вследствие уравновешенности последних гигроскопической и пленочной вод. Вследствие этого гравитационная вода должна передвигаться вниз под влиянием сил тяжести.

Таким образом гравитационная вода может иметь место только при влажности, превышающей максимальную молекулярную влагоемкость.

Распределение влаги в грунте. Если через колонну однородного грунта, опирающуюся на водяное зеркало, фильтровать воду, то после прекращения фильтрации из колонны некоторое время будет происходить сток воды. После прекращения этого стока в грунте будет иметь место следующее распределение влажности.

В нижней части, соответствующей высоте капиллярного подъема, будет иметь место повышение влажности, а выше этой зоны — влажность, соответствующая максимальной молекулярной влагоемкости.

Совершенно такое же распределение влажности будет и тогда, когда нижний конец колонны будет находиться не в воде, а в воздухе. Наличие в этом случае зоны с большой влажностью объясняется тем, что на поверхности раздела грунт-воздух действуют силы поверхностного натяжения, которые удерживают в грунте некоторое количество гравитационной влаги.

Если же колонна будет состоять из неоднородного грунта, то после стекания воды будет иметь место распределение влаги, отличающееся от того, которое было в однородном грунте тем, что мелкозернистый грунт, находящийся в середине колонны, будет иметь влажность, превышающую его максимальную молекулярную влагоемкость. Это также объясняется наличием на поверхности раздела мелкозернистого-крупнозернистого грунта сил поверхностного натяжения, которые и будут удерживать в мелкозернистом грунте некоторое количество гравитационной влаги. Такая влага носит название подвешенной.

Весьма интересен вопрос о том, как происходит нарушение равновесия влаги в грунте. При добавлении в колонну грунта воды через некоторое время снизу начнется ее сток. Если до вливания доломнительной воды в колонне не было слоев с влажностью меньшей максимальной молекулярной влажности, то количество вытекшей воды будет равно количеству добавленной воды. Теперь спрашивается, является ли вытекающая влага той водой, которая была добавлена, или это вода, выжатая из нижних слоев.

Весьма тщательные исследования проф. А. Ф. Лебедева показали, что вытекающая вода является влагой, выжатой из нижних слоев грунта. При этом выжимание начинается только тогда, когда добавленная вода достигнет зоны повышенной влажности.

Если эта зона невысока и если грунт рыхл и крупнозернист, вытекание начнется тотчас же, как только вода дойдет до влажной зоны и будет продолжаться столько же времени, сколько продолжалось добавление воды. Если же толщина этой зоны значительна и если грунт мелкозернист, то стекание начнется не сразу, а через некоторый промежуток времени и будет продолжаться значительно дольше того времени, в течение которого происходило добавление воды.

Таким образом мелкозернистый грунт как бы регулирует вытекание из него гравитационной влаги, делая это вытекание более равномерным.

Приведенные данные о почвенно-грунтовых водах показывают, что мелкозернистые грунты по сравнению с крупнозернистыми имеют большую максимальную молекулярную влагоемкость, обладают большей высотой капиллярного подъема и, кроме того, регулируют вытекание из них гравитационной влаги.

Причины, делающие существующие способы обработки непригодными для песчаных грунтов. Рассмотрим картину движения влаги в песчаном грунте при обработке его раствором соли и солью в твердом виде.

Обработка грунта раствором соли¹. При введении раствора соли в грунт он сравнительно быстро заполнит поры между частицами грунта в некотором объеме, окружающем заземляющий электрод. Введение раствора делает влажность в указанном объеме значительно выше присущей ему максимальной молекулярной влагоемкости. Вследствие этого в грунте начинается происходить следующее передвижение влаги:

а) Часть введенного раствора, образующая гравитационную влагу, под влиянием силы тяжести начнет перемещаться вниз, при этом примерно через 2—3 дня она стечет в зону, лежащую ниже ниж-

¹ См. рис. 1, а.

него конца электрода, а в освобожденном от нее объеме грунта установится влажность, близкая к максимальной молекулярной влагоемкости.

б) При передвижении гравитационной влаги-раствора вниз пленочная вода, ранее находившаяся в объеме грунта, в который был введен раствор, сильно обогатится солью, что приведет к повышению удельной проводимости грунта. Это повышение удержится даже после полного стекания гравитационной влаги-раствора. При этом следует иметь в виду, что по мере передвижения раствора вниз его концентрация будет уменьшаться и уже на уровне нижнего конца заземляющего электрода содержание соли в нем будет незначительным (около 5%). Таким образом гравитационная влага-раствор повышает проводимость преимущественно верхних слоев грунта, слабо сказываясь на проводимости слоев, лежащих ниже нижнего конца электрода.

в) После стекания гравитационной влаги пленочная вода, содержащая соль, из объема, по которому прошла гравитационная влага, будет выходить в окружающую среду до тех пор, пока не установится равновесие. Это приведет к значительному уменьшению количества влаги и соли около заземлителя, что в свою очередь вызовет постепенное понижение удельной проводимости грунта и соответствующее повышение сопротивления заземления.

В действительности нарастание сопротивления происходит гораздо интенсивнее, чем это вызывается выносом соли пленочной водой. Это объясняется попаданием в грунт жидких атмосферных осадков и талой воды, которые быстро вымывают соль, вынося ее в короткий срок в зону грунтовых вод. Вышеизложенным и объясняется, почему при обработке песчаного грунта раствором соли продолжительность действия обработки обычно не превышает 6—8 мес.

г) Что касается эффективности обработки (степень повышения проводимости заземления), то ее относительная незначительность (6—7) объясняется тем, что введенная в грунт соль попадает и некоторое время сохраняется преимущественно в объеме грунта, почти не выходящем за нижний конец электрода. Это равносильно увеличению диаметра электрода d , которое, как это видно из нижеприведенного выражения (1), определяющего сопротивление трубчатого заземлителя, не может дать заметного снижения сопротивления:

$$R = \rho \frac{l_n \left(\frac{4l}{d} \right)}{2\pi l}, \quad (1)$$

где ρ — удельное сопротивление грунта;

l — длина электрода;

d — диаметр электрода.

Вместе с тем выражение (1) также показывает, что значительное уменьшение сопротивления заземления может быть получено лишь путем увеличения длины электрода l , что в свою очередь может быть достигнуто посредством сильного увеличения проводимости грунта под заземляющим электродом.

Обработка грунта твердой солью. В этом случае вода, введенная в соль при ее укладке, образует раствор, который очень быстро стекает в естественный грунт, создавая в объеме грунта, примыкающем к заземляющему электроду, условия, близкие к имевшимся в рассмотренном выше случае обработки раствором соли.

Вследствие этого в рассматриваемом случае и

картина передвижения влаги и рассасывания соли будет почти такой же, как и при обработке грунтом раствором соли.

Однако между способами обработки раствором соли и твердой солью имеется и существенное различие, которое заключается, во-первых, в том, что образовавшийся раствор соли не будет насыщенным, а во-вторых, в том, что выпадающие осадки, проходя через запас твердой соли, его постепенно растворяют, а созданный при этом раствор, проникая в грунт, частично компенсирует происходящую убыль соли из грунта.

Опыты и подсчеты показывают, что в условиях Ленинграда, где в год в среднем выпадает около 650 мм осадков, весь запас соли будет растворен примерно через 10 мес. По истечении этого срока дождевая и талая вода будет уже уменьшать содержание соли в грунте, как это имело место при обработке грунта раствором соли.

Таким образом при применении твердой соли продолжительность действия обработки будет несколько выше, чем при обработке раствором соли, но все же она недостаточна для практики.

Что касается эффективности обработки, то вследствие того, что в рассматриваемом случае соль попадает в объем грунта, несколько меньший, нежели при обработке раствором, то она будет еще меньше, т. е. повышение проводимости заземления будет меньше шестикратной величины.

Пути устранения недостатков существующих способов обработки. Из изложенного выше следует, что недостатки существующих способов искусственного повышения проводимости заземляющих устройств (недостаточная эффективность обработки, незначительная длительность действия обработки) объясняются прежде всего тем, что большая часть введенного в грунт раствора соли располагается преимущественно в объеме грунта, окружающем заземляющий электрод, и тем, что этот раствор вымывается из грунта весьма быстро.

Изучение свойств грунтов и почвенно-грунтовых вод показало, что для устранения этих недостатков следует заземляющий электрод и запас предназначенной для обработки соли помещать не в естественный грунт (песок), а в относительно плотную и относительно хорошую проводящую среду с достаточно большой влагоемкостью и достаточно малым коэффициентом фильтрации.

Искусственной средой, удовлетворяющей этим требованиям, с успехом могут служить мелкозернистые грунты, как, например, легкие и средние глины, садовая или огородная земля, жирные черноземы, обладающие большой влагоемкостью (~20%).

При окружении заземляющего электрода искусственно увлажненным слоем мелкозернистого грунта, смешанного с твердой солью, во-первых, будут созданы условия, устраняющие быстрое растворение и вымывание соли, как потоками гравитационной воды, так и водой, передвигающейся под влиянием молекулярных сил. Во-вторых, образовавшийся раствор соли будет проникать преимущественно в объем грунта, расположенный под заземляющим электродом, что равносильно удлинению электрода, вызывающему значительное уменьшение сопротивления заземления.

Эти выводы вытекают из рассмотрения картины распределения и передвижения влаги-раствора, которая при указанном способе обработки будет иметь следующий вид:

а) Влага, введенная в смесь мелкозернистого грунта с солью при ее укладке вокруг заземляющего электрода, с одной стороны, создает влажность, превышающую максимальную молекулярную влагоемкость мелкозернистого грунта, а с другой стороны, растворяет достаточно большое количество соли, образуя при этом почти насыщенный раствор.

б) Часть этой избыточной влаги вместе с содержащейся в ней солью под влиянием силы тяжести будет весьма медленно передвигаться вниз³, постепенно вытекая из мелкозернистого грунта в песок. Однако передвигаться вниз будет далеко не вся гравитационная влага. Это объясняется тем, что в нижней плоскости раздела мелкозернистый грунт-песок образуются силы поверхностного натяжения, удерживающие в мелкозернистом грунте часть гравитационной влаги.

Таким образом в мелкозернистом грунте будет иметь место так называемая подвешенная вода, что в свою очередь приводит к тому, что влажность мелкозернистого грунта будет значительно выше присущей ему максимальной молекулярной влагоемкости.

в) При последующем проникновении в мелкозернистый грунт некоторого количества воды (дождевой или талой воды), ранее установившееся в нем равновесие будет нарушено, и из мелкозернистого грунта вытечет в находящийся под ним песок примерно такое же количество влаги, какое поступило в мелкозернистый грунт после установления равновесия.

Так как при равновесии влажность мелкозернистого грунта была значительно выше максимальной молекулярной влагоемкости, то вытекающая влага не будет водой, попавшей в него дополнительно. Это будет влага, выжатая создавшимся гидростатическим давлением из нижних слоев мелкозернистого грунта. Вследствие этого вытекание влаги начнется через значительно более короткий промежуток времени, чем это требуется для прохождения воды через весь столб мелкозернистого грунта.

Таким образом вода, попавшая в мелкозернистый грунт через его верхнюю поверхность, через некоторый промежуток времени вызовет вытекание из его нижней поверхности почти такого же количества влаги⁴, содержащей соль в концентрации, близкой к насыщению. В свою очередь вновь попавшая в мелкозернистый грунт вода обогатится находящейся там солью.

г) Так как в рассматриваемом случае влажность мелкозернистого грунта больше присущей ему максимальной молекулярной влагоемкости, то при наличии соответствующих условий⁵ может иметь место передвижение пленочной воды с содержащейся в ней солью в окружающий песок.

Однако вследствие того, что применяемый мелкозернистый грунт обладает большой плотностью, а движение пленочной воды имеет направление из плотного грунта в относительно рыхлый (песок) скорость перемещения пленочной воды будет значительно меньше, чем это имело бы место, если бы мелкозернистый грунт для обработки не применялся.

В тех же случаях, когда влажность окружающего песчаного грунта равна или больше присущей ему максимальной молекулярной влагоемкости⁶, передвижения пленочной воды вообще не будет.

д) Вне зависимости от влажности окружающей среды, из мелкозернистого грунта в песок будет происходить диффузия соли. При этом вследствие большой плотности мелкозернистого грунта ее скорость будет значительно меньше, чем это имело бы место, если бы он отсутствовал.

е) В отличие от старых способов обработки в настоящем случае вынос раствора соли будет происходить почти полностью в объем песка, лежащий под мелкозернистым грунтом. Так как при этом будет иметь место почти насыщенный раствор соли ($p \approx 20\%$) и влажность песка будет не меньше 10% , то слои песка, лежащие непосредственно под мелкозернистым грунтом, должны иметь весьма небольшое удельное сопротивление (порядка $200 \text{ } \Omega \text{ см}$). Однако по мере углубления содержание соли в рассматриваемом объеме песка будет постепенно уменьшаться, так как часть соли, находящейся в движущейся вниз гравитационной влаге, будет задерживаться вышележащими слоями песка и рассасываться в окружающую среду в результате диффузии. Вследствие этого с углублением удельное сопротивление слоев объема песка, лежащего под мелкозернистым грунтом, хотя и незначительно, но все же будет повышаться.

Новый способ обработки (способ автора). При разработке нового способа искусственного повышения проводимости заземляющих устройств ставилась задача путем соответствующей обработки добиться повышения проводимости заземления не менее чем в 10 раз и притом с тем, чтобы достигнутое повышение удерживалось в течение значительного срока — не менее, чем в течение пяти лет.

Новый способ обработки базируется на изложенных выше принципах, позволяющих, с одной стороны, устранить быстрое растворение применяемой для обработки соли и быстрое вымывание раствора этой соли, а с другой стороны — создать под электродом призму естественного грунта с очень большой проводимостью.

В естественном грунте (песке) вырывается котлован сечением около $1 \times 1 \text{ м}$ и глубиной, равной или несколько большей длины заземляющего электрода.

В этот котлован по его оси устанавливается трубчатый заземляющий электрод с наружным диаметром около 4 см и длиной 2—2,5 м, нижний конец которого остается открытым, а верхний закрывается пробкой. После установки электрода котлован до половины высоты засыпается смесью мелкозернистого грунта (сутлинок, огородная земля, чернозем) с большим количеством поваренной соли. Эта смесь обильно смачивается водой (примерно 100 л) и утрамбовывается.

Общий вид заземления, устроенного указанным способом, приведен на рис. 2.

Выбор рода мелкозернистого грунта, рода соли и ее количества, а также габаритов котлована и способа расположения в нем мелкозернистого грунта и соли обосновывается нижеследующими соображениями.

⁶ Наблюдения показывают, что в песчаных грунтах в условиях Ленинграда влажность, меньшую максимальной молекулярной влагоемкости, могут иметь слои грунта, находящиеся на глубине до 1 м и притом в летние месяцы и при отсутствии дождей.

³ Вследствие большой плотности мелкозернистого грунта скорость передвижения влаги будет меньше 0,5 см/сутки.

⁴ Часть дополнительно добавленной воды может пойти на покрытие потери влаги из верхних слоев грунта, вызванной испарением и передвижением пленочной воды.

⁵ При условии, что влажность окружающего песчаного грунта будет меньше присущей ему максимальной молекулярной влагоемкости.

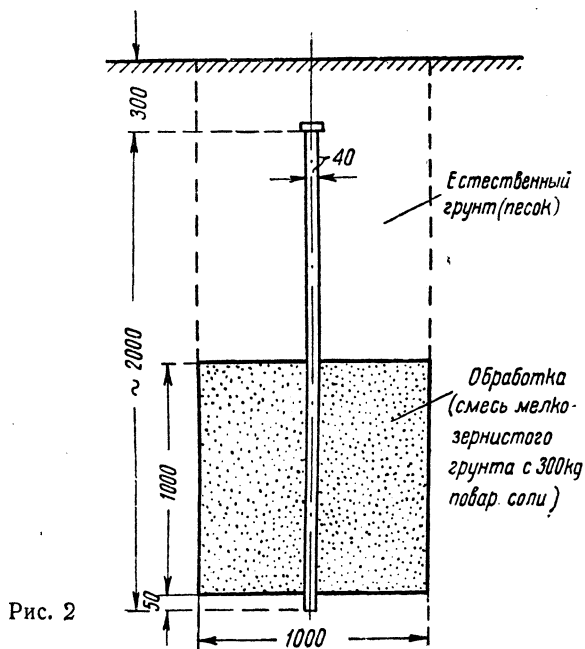


Рис. 2

Выбор рода мелкозернистого грунта. Выбор в качестве мелкозернистого грунта суглинка, огородной земли или чернозема, а не тяжелых глин, обладающих еще большей мелкозернистостью и влагоемкостью, объясняется тем, что последняя обладает таким малым коэффициентом фильтрации, при котором передвижение гравитационной воды практически происходить не будет, что в свою очередь исключит подачу соли в песок, находящийся под заземляющим электродом.

С интересующей нас точки зрения свойства суглинка, огородной земли и чернозема настолько близки друг к другу, что отдать предпочтение кому-либо из них затруднительно.

Род и количество соли. Пригодной для повышения проводимости заземляющих устройств можно считать такую соль, которая достаточно хорошо растворяется в воде, раствор которой имеет большую проводимость, которая не вызывает сильной коррозии железных заземляющих электродов и притом не дефицитна и недорога.

Сравнение указанных свойств ряда солей (NaCl , CuSO_4 , FeSO_4 , MgSO_4 , Na_2CO_3 , Na_2SO_4 и CaCl_2) показало, что поваренная соль за исключением способности вызывать несколько повышенную коррозию обладает значительно лучшими показателями, чем другие соли.

Так как опыты показывают, что увеличение коррозии электродов от присутствия поваренной соли практически мало ощутимо, то можно считать, что поваренная соль является наиболее приемлемой для повышения проводимости заземляющих устройств.

К решению вопроса о количестве соли следует подходить, исходя из того, что оно должно быть во всяком случае не меньше, чем это требуется для обеспечения условий, при которых гравитационная влага-раствор, находящаяся в мелкозернистом грунте, не замерзала бы; для создания в лежащей под мелкозернистым грунтом призме песчаного грунта очень высокой удельной проводимости.

Подсчеты показывают, что в условиях средней полосы европейской части СССР для устранения замерзания гравитационной влаги последняя должна содержать соль с концентрацией 0,8 грамм-молекул на 1000 г растворителя. При влажности мелкозернистого грунта около 60% такой концентрации со-

ответствует содержание 56 kg соли на 1 m³ грунта.

Что касается обеспечения высокой проводимости призмы песчаного грунта, находящейся под мелкозернистым грунтом, то, полагая, что эта призма имеет сечение 1×1 m и высоту около 3 m и что ее влажность составляет около 20% при концентрации 10%, содержание в ней соли должно быть равно 120 kg.

Полученные выше цифры дают возможность ориентировочно подсчитать количество соли, необходимое на один заземляющий электрод. Это количество составляет 176 kg.

Однако следует иметь в виду, что такое количество соли должно находиться в растворенном виде, если можно так выразиться, быть в работе.

Совершенно очевидно, что количество твердой соли, вводимой в мелкозернистый грунт, должно быть больше 176 kg, так как необходим запас соли для покрытия ее убыли от выноса в окружающую среду. Специальные подсчеты показали, что в условиях Ленинграда из мелкозернистого грунта ежегодно будет выноситься около 13 kg соли. Таким образом при создании запаса на 10 лет в мелкозернистый грунт, помимо указанных выше 176 kg, должно быть дополнительно введено еще 130 kg соли и общее количество соли на один трубчатый заземляющий электрод должно быть порядка 300 kg.

Размеры котлована и расположение в нем мелкозернистого грунта и соли. При выборе размера котлована приходится исходить из надобности поместить в нем объем мелкозернистого грунта, который содержать в себе влагу и соль в количестве необходимом для образования достаточно мощной призмы песчаного грунта с высокой проводимостью и для обеспечения достаточной термической устойчивости заземления. Помимо этого, при выборе горизонтальных размеров котлована приходится учитывать необходимость иметь некоторые минимальные размеры, позволяющие вырыть котлован глубиной в 2—2,5 m.

Размером, удовлетворяющим оба эти требования является 1×1 m. Таким образом котлован должен иметь размер $2,5 \times 1 \times 1$ m.

Из изложенного выше следует, что мелкозернистый грунт должен быть расположен в котловане так, чтобы он доходил до нижнего конца заземляющего электрода. При этом возникает лишь вопрос: следует ли мелкозернистый грунт укладывать с самой поверхности земли. Нижеследующие соображения показывают, что этого делать не следует. При укладке мелкозернистого грунта до самой поверхности земли прежде всего из него, как из грунта с большой плотностью, испарялось бы большое количество влаги, а это привело бы к подсушиванию его верхних слоев и к подъему к ним влаги снизу (для последующего испарения), что в засушливые годы в свою очередь привело бы к снижению влажности всего объема мелкозернистого грунта до его максимальной молекулярной влагоемкости и ниже. С другой стороны, при укладке мелкозернистого грунта до поверхности земли, он в своей верхней части соприкасался бы со слоями песка, имеющими влажность меньше присущей максимальной молекулярной влагоемкости, что привело бы к передвижению пленочной влаги и содержащейся в ней соли из мелкозернистого грунта в окружающую среду. И, наконец, относительно

⁷ Приведенные цифры подтверждаются как расчетными, так и опытными данными.

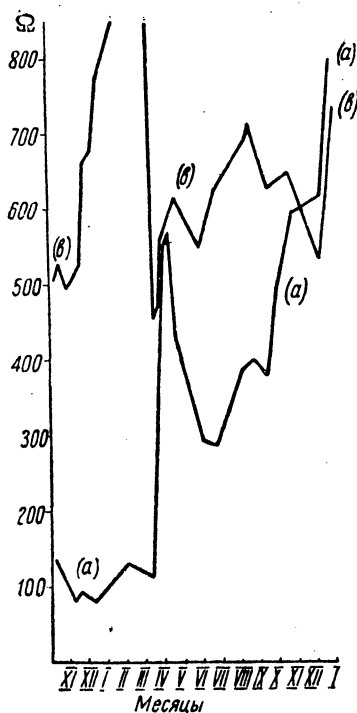


Рис. 3

большая влажность верхних слоев песчаного грунта и незначительная проводимость делают верхнюю часть электрода и окружающий его мелкозернистый грунт мало эффективным в создании проводимости заземляющего устройства.

Опыты, произведенные в естественных условиях, показывают, что при расположении мелкозернистого грунта до середины и до верха котлована, сколько бы существенного различия в сопротивлении заземления не наблюдается. Это позволяет нам считать, что мелкозернистый грунт следует укладывать от дна котлована примерно до половины его высоты.

Экспериментальная проверка нового способа.

Для проверки в естественных условиях нового способа искусственного повышения проводимости заземляющих устройств, расположенных в песчаных грунтах, летом 1936 г. на территории Ленинградского индустриального института был устроен ряд (шт.) опытных одиночных трубчатых заземлителей, обработанных как старыми способами, так и названным выше способом автора, а также ряд необработанных контрольных заземлителей.

Участок, на котором расположены опытные и контрольные заземлители, представляет собою почти горизонтальную площадку. Грунт этой площадки — средне- и крупнозернистый полевощпатовый песок в слое мощностью до 20 м со средним удельным сопротивлением порядка $2 \cdot 10^5 \Omega \text{ см}$. При этом первый горизонт грунтовых вод расположен на глубине 3,5—5,5 м.

Как опытные, так и контрольные заземлители подвергались следующим испытаниям.

Регулярно производилось измерение сопротивления заземления с увязкой полученных результатов с температурой атмосферы и почвы, так и с количеством выпавших жидких осадков и со снежным покровом.

Производилось определение распределения потенциалов на поверхности земли вокруг заземлителей. Жоло заземлителей было произведено определение удельного сопротивления песка и мелкозернистого грунта на разных глубинах⁸. При этом полу-

Для этого с разных глубин извлекались образцы грунта.

ценные результаты увязывались с влажностью и гранулометрическим составом, которые определялись попутно с измерением удельного сопротивления.

Результаты измерения сопротивления опытных и контрольных заземлителей представлены в виде кривых, приведенных на рис. 3 и 4. При этом на рис. 3 приведены данные для заземлителя, обработанного старым способом⁹ (кривая a) и для расположенного около него необработанного контрольного заземлителя (кривая b). На рис. же 4 — для заземлителя, обработанного способом автора (кривая c) и для расположенного в 2,5 м от него необработанного контрольного заземлителя (кривая d).

Эти данные, с одной стороны, подтверждают непригодность старых способов обработки для песчаных грунтов, а с другой стороны, показывают, что при обработке новым способом примерно через 6 мес. после обработки сопротивление опытного заземлителя опускается до величины 12—13 Ω , которая затем остается стабильной, несмотря на изменения атмосферных условий и резкие изменения сопротивления контрольных заземлений. При этом величина отношения сопротивления контрольного заземления к сопротивлению опытного заземления (коэффициент эффективности обработки) колеблется от 25 до 50.

Другие опытные заземлители, обработанные по новому способу, но расположенные на другом участке в более сухом песчаном грунте с большим удельным сопротивлением, показали несколько большее сопротивление заземления (порядка 60—70 Ω), однако при этом стабильность сопротивления и коэффициент эффективности обработки остался таким же, как и для указанного выше заземлителя.

Измерения удельного сопротивления образцов грунтов, вынутых из объема, окружающего заземлитель, обработанный по новому способу, показали наличие под мелкозернистым грунтом призмы естественного грунта (песка), сильно обогащенного раствором соли и обладающего весьма малым удельным сопротивлением (200—250 Ω), в то время как удельное сопротивление песка, примыкающего к боковым граням мелкозернистого грунта, составляет около $1 \cdot 10^5 \Omega \text{ см}$ и более.

Таким образом опытные данные, полученные в естественных условиях, подтверждают сделанные выше предположения о характере распределения

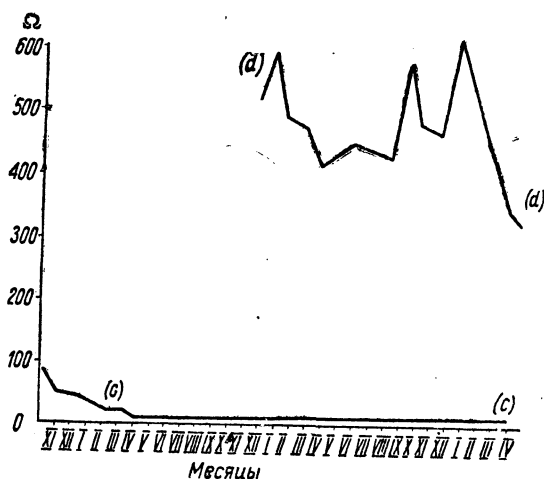


Рис. 4

⁹ 60 kg твердой соли на один трубчатый заземлитель.

влаги-раствора, о ее медленном и равномерном передвижении вниз почти исключительно по сечению мелкозернистого грунта, а также об образовании под заземляющим электродом призмы естественно-го грунта, обладающего весьма малым удельным сопротивлением.

Распределение потенциалов вокруг заземлителей. Теоретические соображения, полностью подтвержденные нашими экспериментальными исследованиями, проведенными в естественных условиях, показали, что распределение потенциалов на поверхности земли вокруг заземлителей, обработанных по новому способу, является более плавным, чем у заземлителей, обработанных старыми способами.

Как известно, более плавное распределение потенциалов сказывается положительно на величинах напряжения прикосновения и шага и отрицательно — на коэффициенте использования сложного заземления. Однако для заземляющих устройств с искусственно повышенной проводимостью некоторое уменьшение коэффициента использования существенного значения не имеет, так как достигнутое искусственной обработкой снижение сопротивления в десятки раз перекрывает увеличение сопротивления, вызванное усилением взаимного экранирования электродов.

Коррозия электродов в заземляющих устройствах, обработанных по новому способу. Как известно, железные неоцинкованные электроды в необработанных заземляющих устройствах подвергаются действию коррозии весьма незначительно; при этом образовавшийся на электродах слой продуктов коррозии не приводит к сколь-нибудь заметному увеличению сопротивления. Последнее объясняется тем, что продукты коррозии имеют удельное сопротивление меньше удельного сопротивления естественного грунта.

Исходя из электрохимической теории коррозии, были основания предполагать, что железные электроды, помещенные в грунт, — содержащий большое количество соли и влаги, что и имеет место при искусственном повышении проводимости заземляющих устройств, — будут подвергаться более интенсивной коррозии. Однако произведенные опыты (черная газовая труба $d = 1\frac{1}{4}$ " и $l = 2$ м находилась в течение 2,5 лет в котловане размером

$1 \times 1 \times 2$ м, засыпанном смесью песка с морской солью¹⁰) не подтвердили эти опасения. Тщательный осмотр опытного электрода показал, что он покрыт слоем окислов толщиной всего лишь в 2—3 мм и что никаких заметных разрушений стенок электрода не имеется.

Ожидать усиления коррозии в дальнейшем так едва ли приходится, так как образовавшийся на электроде слой окислов, как это показывают многочисленные опыты ряда авторов, значительно замедляет дальнейшую коррозию. Таким образом, при устройстве заземлений, обработанных по новому способу, опасаться усиленной коррозии не следует.

Выводы. 1. Произведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что новый способ обработки, разработанный с учетом физических свойств грунтов и законов передвижения поровенно-грунтовых вод, дает возможность добиться искусственного повышения проводимости заземляющих устройств, расположенных в песчаных грунтах примерно в 25 раз, и что достигнутая проводимость сохраняется в течение не менее трех лет (длительность наблюдения). При этом есть все основания предполагать, что продолжительность действия обработки будет значительно больше указанного срока.

Таким образом новый способ обработки удовлетворяет требованиям практики и может быть применен в самых ответственных случаях.

2. Сравнительно ограниченное число имевшихся в распоряжении автора опытных заземлителей, обработанных по новому способу, еще не позволяет окончательно установить расчетный коэффициент эффективности обработки. Для этого необходимо построить несколько десятков опытных заземлений в разных пунктах СССР и вести за ними регулярные наблюдения в течение достаточно продолжительного срока.

3. Однако в необходимых случаях уже теперь возможно рекомендовать применять новый способ повышения проводимости заземляющих устройств, расположенных в песчаных грунтах, считая при этом, что он дает снижение сопротивления заземления примерно в 10 раз и что продолжительность действия обработки будет около трех лет.

¹⁰ При этом содержание соли составляло 25% от веса песка.

О проекте новых правил устройства заземлений¹

А. С. ГРАММАТЧИКОВ

Москва

Основной исходной величиной при проектировании защитных заземляющих устройств является напряжение прикосновения — напряжение, под которым может оказаться человек, прикасающийся к части электрической установки, нормально не находящейся под напряжением, но попавшей под напряжение в результате аварии. Принимаемое в качестве расчетного напряжение прикосновения должно исключать всякую возможность поражения током. Обращаясь к данным статистики, мы видим, что хотя и не вполне безопасными, но во всяком случае не

смертельными являются напряжения, не превышающие 40 В; конечно, при некоторых, особенно в неблагоприятных условиях ожоги возможны и при напряжениях ниже 40 В.

Минимальное напряжение прикосновения — 65 В, предлагаемое проектом «Правил устройства заземлений в установках, работающих при напряжении ниже 1000 В», и регламентируемое действующим в настоящее время «Руководящими указаниями для наиболее неблагоприятных условий применения». Прежде всего при напряжениях порядка 65 В статистика ежегодно отмечает несчастные случаи нередко со смертельным исходом. В нашем рас-

¹ В порядке обсуждения. Ред.

жении имеется фактический материал, указывающий, что, например, с 1 января 1937 г. по 1 июля 1938 г. в Москве было зарегистрировано 6 случаев поражения током при напряжении 65 В, сопровождавшихся ожогами, потерей сознания и т. п.; эти случаи имели место в самых разнообразных условиях при производстве сварочных работ.

Также необосновано соображение проекта «Правил» (§ 33) о том, что при напряжении 220/127 В допускаемое напряжение прикосновения должно быть 40 В, а при напряжении 380/220 В — 65 В. Опасность для человека, прикасающегося к корпусу прибора, определяется не рабочим напряжением, а напряжением прикосновения. Если напряжение 65 В опасно при рабочем напряжении 220/127 В, то при тех же свойствах производственного помещения оно столь же опасно и при рабочем напряжении 380—220 В.

Не менее важен вопрос о выборе напряжения прикосновения, обеспечивающего безопасность установок так называемого высокого напряжения или по новой терминологии установок, работающих при напряжении выше 1000 В. Действующие «Правила» регламентируют основное напряжение прикосновения 150 В для установок высокого напряжения совершенно независимо от условий их эксплуатации. По нашему же мнению, именно условия эксплуатации являются решающим фактором при выборе напряжения прикосновения, как это, впрочем, учитывается проектом новых «Правил».

При определенных условиях как действующие «Руководящие указания», так и проект «Правил» допускают значительное увеличение расчетного напряжения прикосновения путем деления основного напряжения прикосновения на соответствующие коэффициенты прикосновения, могущие изменяться в пределах от 0,2 до 0,75 (§ 26 проекта «Правил»). Таким образом получены эти коэффициенты и к каким конструкциям заземляющих устройств они относятся, из пояснения к § 26 проекта не вполне ясно. Положение это возражений не встречает. Однако, буквально понимая соответствующие пункты «Руководящих указаний», до сего времени нередко считают, что независимо от специфических свойств производственных помещений, где располагаются заземляемые части электрических установок, независимо от условий эксплуатации и от большей или меньшей вероятности и длительности прикосновения к ним не только квалифицированных, но и неквалифицированных работников, расчетное напряжение прикосновения может быть 150 В, даже при формально высоких напряжениях 380 и 500 В. Мы уже не говорим о выборе такого напряжения прикосновения при напряжениях 3000 и 6000 В.

При таких напряжениях прикосновения опасность может оказаться вполне реальной для расположенных высоковольтных приводных электродвигателей в специальных закрытых помещениях, которые в ряде случаев, конечно, совершенно неправильно относятся к числу замкнутых электромашиных помещений (причем самые установки неправильно относятся к числу установок без длительного прикосновения). Неверно это потому, что высоковольтные электродвигатели, служащие для привода крупных производственных механизмов, подобных прокатным станам, шаровым мельницам, вентиляторам и т. п., почти всегда имеют металлическое соединение с исполнительными механизмами с помощью редукторов или жестких металлических муфт. Благодаря этому при повреждении изоляции электродвигателя одновре-

менно с его корпусом под напряжение попадают все части производственного механизма, прикосновение к которым может оказаться опасным. Поэтому в условиях работы фабрично-заводских установок напряжение прикосновения должно выбираться одинаковым при всех напряжениях так, чтобы оно не превосходило безопасной величины 40 В. Эта точка зрения более или менее разделяется проектом новых «Правил», где § 22 для некоторых помещений регламентирует напряжение прикосновения 65 В, независимо от рабочего напряжения.

Чтобы особенно подчеркнуть недопустимость напряжения прикосновения 65 В и выше в производственных помещениях, следует вспомнить никак не оспариваемое положение о применении исключительно по соображениям безопасности напряжения 36 В для местного освещения станков, несмотря на то, что для этого приходится устанавливать дорогостоящие понизительные трансформаторы, нередко на каждом станке. На том же станке, на котором располагается лампа, работающая при напряжении 36 В, монтируется и приводной электродвигатель, работающий, например, при напряжении 500 В и имеющий защитное заземление, рассчитываемое в соответствии с проектом «Правил», исходя из напряжения прикосновения 65 В или даже 150 В. Следовательно, в момент аварии корпус электродвигателя, металлически соединенный с ним станок и соединенная со станком арматура лампы для местного освещения (хотя и работающей при напряжении 36 В) окажутся под опасным напряжением по отношению к земле. Спрашивается, какой смысл вводить напряжение 36 В для местного освещения, если напряжение прикосновения составляет 65 или 150 В?

Наконец, соображения о значении возможного времени прикосновения к находящимся под напряжением частям, излагаемые в п. 28 проекта «Правил», по нашему мнению необоснованы, потому что по данным опыта имеет значение не длительность прохождения тока через тело человека, а совпадение момента прохождения тока с определенной фазой сердечной деятельности.

Таким образом мы приходим к выводу, что выбор напряжения прикосновения в зависимости от того, относится ли напряжение системы по формальному признаку к числу высоких или низких, ничем не оправдывается. В качестве признака, определяющего выбор расчетного значения напряжения прикосновения, следует принимать условия эксплуатации электрического оборудования. Для всех установок, в соприкосновении с которыми находится большое количество работающих людей (при всех рабочих напряжениях), напряжение прикосновения должно приниматься 65 В в случае производственных помещений без повышенной опасности и 40 В во всех остальных случаях.

Для аппаратуры, располагающейся в замкнутых электромашиных помещениях, куда вход разрешается только лицам, имеющим достаточно высокую квалификацию, где работают вдвоем, где имеются изолированные подставки и резиновые ковры, где пользуются изолированными штангами, шипцами, перчатками, галошами и ботами, где невозможно длительное прикосновение к попавшим под напряжение частям и т. п., напряжение прикосновения можно сохранить 65, 100 или 150 В с введением коэффициентов, допускающих при определенных условиях их повышение (§ 26 проекта «Правил»).

В отношении методов расчета защитных заземля-

ющих устройств все системы трехфазного тока разбиваются на системы с изолированными и системы с заземленными нулевыми точками. В свою очередь системы с заземленными нулевыми точками можно разделить на системы без нулевого провода и системы с заземленным нулевым проводом.

Ввиду того что отнесение электрических установок к числу установок низкого напряжения, как и к числу установок, работающих при напряжениях до 1000 V, ровно ничего не говорит об их безопасности, а методы расчета заземляющих устройств не зависят от напряжения, автор считает целесообразным отказаться от существующего в настоящее время деления заземляющих устройств на заземляющие устройства в системах низкого напряжения и заземляющие устройства в системах высокого напряжения. Нет и не может быть разницы в методах расчета заземляющих устройств в системах с изолированной нулевой точкой работающих, например, при низком напряжении 220 V или при высоком напряжении 500 V (по действующей в настоящее время терминологии) или при напряжениях 220 V и 550 V и при напряжении 3000 V (по терминологии, предлагаемой проектом).

Во всех случаях задач расчета является определение сопротивления растеканию заземлителей, необходимого для того, чтобы напряжение прикосновения не превосходило заданной величины.

Решение вопроса о заземляющих устройствах в установках, работающих при напряжениях до 1000 V с изолированными нулевыми точками, очень часто осложняется отсутствием критерия, указывающего на их необходимость или на возможность отказа от них. В частности, споры обычно возникают при рассмотрении случаев при напряжениях 220 и 127 V. Однако критерий несомненно существует и им является ток, могущий пройти через тело человека, прикасающегося в момент аварии к корпусу прибора. В этом случае фактором, значительно увеличивающим опасность поражения током, является емкость кабельных сетей, несколько большая у кабелей, работающих при напряжениях ниже 1000 V. $(0,3 \div 0,4 \frac{\mu F}{km})$ и меньшая у кабелей, работающих при напряжениях 1000 V $(0,2 \frac{\mu F}{km})$ и выше.

Ток, проходящий через тело человека, в сетях, не обладающих сколько-нибудь заметной емкостью, можно определить по формуле:

$$I' = \frac{U_A \sqrt{3}}{3R + r_u} \quad (1)$$

В сетях, емкостью которых пренебречь нельзя, ток определяется по формуле:

$$I' = \frac{U_A \sqrt{3}}{\sqrt{(3R + r_u)^2 + (3R r_u \omega C_0 l 10^{-6})^2} \cdot 1 + (r_u \omega C_0 l 10^{-6})^2} \quad (2)$$

где C_0 — емкость сети в $\frac{\mu F}{km}$, а l — длина кабельной сети в km.

Если ток I' превосходит 0,04 A, т. е. может оказаться смертельным, заземляющие устройства необходимы. При токах, меньших 0,04 A, можно, вообще говоря, ставить вопрос об отказе от них. Определение емкости сети затруднений не пред-

ставляет, если известна длина кабельной сети или ее емкостный ток. Сопротивление тела человека во всех случаях принимается 1000 Ω , на более вероятное при самых неблагоприятных условиях. С наибольшими затруднениями связано, конечно, определение сопротивления изоляции сети.

Даже для сети, находящейся в полном порядке но сильно разветвленной, т. е. состоящей из большого количества включенных параллельных ответвлений, результирующее сопротивление изоляции может оказаться настолько низким, что ток I' , проходящий через тело человека, достигнет опасной величины. Так как в соответствии с требованиями „Правил“ каждая группа приемников тока должна иметь сопротивление изоляции не меньше 1000 Ω на 1 V, сопротивление изоляции r_u при n параллельных группах составит

$$r_u = \frac{1000 U_A}{n}$$

Так как активное сопротивление утечки, следовательно, и опасность поражения током, определяются числом параллельных групп, очевидно, нет никаких оснований объединять распределительные сети, присоединяемые к стороне низшего напряжения нескольких параллельно работающих трансформаторов.

Для определения тока I' , проходящего через тело человека при наличии защитного заземления, сопротивление растеканию которого равно, служат формулы:

$$I' = \frac{U_A \sqrt{3}}{3R + \frac{r_u}{a}}$$

без учета емкости сети и

$$I' = \frac{U_A \sqrt{3}}{\sqrt{(3R + \frac{r_u}{a})^2 + (3R r_u \omega C_0 l 10^{-6})^2} \cdot 1 + (r_u \omega C_0 l 10^{-6})^2}$$

с учетом емкости сети, где

$$a = \frac{r_1}{R + r_1}$$

На основании формул (3), (4) и (5) можно сделать вывод, что как в случае внутривоздушных, так и кабельных сетей протяжением не более 20 km заземлитель, сопротивление растеканию которого не превосходит 20 Ω , обеспечивает безопасность даже при 100 \div 200 параллельных включенных группах приемников тока. Практическое осуществление заземлителей, сопротивление растеканию которых составляет 20 Ω , не представляет никаких затруднений. В большинстве случаев практики для этого вполне достаточно забить в землю 3 трубы диаметром (37 \div 65) mm и длиной (2,5 \div 3) m на расстоянии 3 m одна от другой. Сопротивление растеканию 20 Ω достаточно и для обеспечения безопасности при напряжениях до 11 kV включительно, при условии, однако, не слишком большой емкости сети. Подсчеты по формулам показывают, что при напряжениях до 1000 V (емкость кабеля 0,3 \div 0,4 $\frac{\mu F}{km}$) опасность впол-

реально уже при суммарной длине кабелей 3 км, в то время как на ряде промышленных предприятий длина кабельных сетей превосходит 10–20 км. Поэтому при кабельных сетях заземляющие устройства необходимы почти всегда.

По-инному обстоит дело в случаях присоединения потребителей тока — крупных приводных электродвигателей, работающих при напряжении 3,6 и даже 11 кВ — непосредственно к районным кабельным сетям. Пользуясь уравнением (2) и подставляя в него длину кабельной сети порядка 100 и больше километров, мы можем сделать заключение, что благодаря весьма малым реактивным сопротивлениям кабельной сети получить напряжения прикосновения не только 40 или 65 В, но и 150 В практически невозможно ни при сопротивлении растеканию защитных заземлителей 20 Ω, ни при их сопротивлении растеканию 10 Ω. Между тем необходимость снижения напряжений прикосновения исключительно актуальна: 1) при электрификации промышленных предприятий, 2) при электрификации собственных нужд электрических станций и 3) при обеспечении безопасности работы трансформаторных пунктов и фидерных подстанций в кабельных сетях.

Казалось бы, наиболее простым средством для облегчения устройства заземлителей является компенсация емкости сети. Однако практически полный резонанс токов недостижим, и часть емкостного тока всегда остается некомпенсированной ввиду возможности периодических, хотя бы и кратковременных, отключений части сети. Кроме того, условия защиты сетей требуют включения между нулевой точкой трансформатора и землей сопротивлений, необходимых для работы защиты. В зависимости от местных условий ток заземления может колебаться в пределах от 45 до 100 А. Как бы то ни было компенсация емкости сети упрощает устройство заземлителей. Так например, для кабельной сети длиной 100 км, изоляция которой находится в безукоризненном состоянии (при $r_u \sim \infty$), а некомпенсированная часть емкости составляет 20% от ее полной емкости, ток, проходящий через тело человека, можно определить по формуле (6), полученной простым преобразованием формулы (4):

$$I' = \frac{U_L \sqrt{3} \omega C_0 / 10^{-6}}{\sqrt{\frac{1}{a^2} + (3R \omega C_0 / 10^{-6})^2}}. \quad (6)$$

При напряжении сети 6600 В и при сопротивлении растеканию защитного заземлителя $r_1 = 20 \Omega$ ток, проходящий через тело человека, $I' = 0,268$ А. При сопротивлении растеканию защитного заземлителя 1 Ω и, следовательно, $a = 0,001$, ток $I' = 0,014$ А уже не может представить смертельной опасности для человека.

Приведенные соображения полностью распространяются только на установки фабрично-заводского типа. При необходимости заземления аппаратуры, расположенной в замкнутых электромашиных помещениях, компенсация емкости кабельной сети облегчает устройство защитных заземлителей.

При электрификации промышленных предприятий совершенно правильное решение о широком применении приводных электродвигателей, работающих при напряжении 3,3 и 6,6 В, упирается в затруднения, связанные с устройством защитных заземлителей. Особенно сложен этот вопрос

при питании электродвигателей высокого напряжения непосредственно от районной кабельной сети. Не говоря уже о нежелательности непосредственного присоединения силовых приемников тока к районной сети ввиду возможности нарушений ее нормальной работы при авариях приводных электродвигателей, устройство защитных заземлителей часто оказывается технически совершенно невыполнимым. Выходом из положения могут явиться разделительные трансформаторы с коэффициентом трансформации 1:1 или 1:2. В этом случае емкость кабельной сети, определяющаяся ее длиной в пределах предприятия, в большинстве случаев не может превышать 15–20 км; поэтому сопротивление растеканию 15–20 Ω вполне обеспечивает безопасность даже при напряжении 11 кВ.

Соображения о большей опасности систем, работающих при напряжениях 380 В с изолированными нулевыми точками, по сравнению с системами 380/220 В с заземленными нулевыми точками, основанное на том, что при обрыве одного из линейных проводов и его падении на землю человек, прикасающийся к другому проводу или к корпусу прибора с неисправной изоляцией, может оказаться вместо фазного под линейным напряжением, по мнению автора, не имеют достаточных оснований. Дело в том, что в системах с изолированными нулевыми точками напряжение, под которым окажется человек, определяется соотношением сопротивления тела человека и сопротивления растеканию упавшего на землю провода. Практически сопротивление тела человека составляет сотни Ω, т. е. настолько велико, что при линейном напряжении 220 В человек, прикасающийся к заземленному корпусу прибора, внутри которого произошло повреждение изоляции, и сопротивление растеканию заземлителя которого составляет 20 Ω, не попадает под опасное напряжение, если сопротивление растеканию провода, лежащего на земле, превышает 90 Ω. Другими словами, практически человек почти ни при каких условиях не может оказаться под напряжением, превышающим фазное.

Этим объясняется, что системы с изолированными нулевыми точками оказались относительно безопасными, несмотря на наличие однополюсных замыканий на землю, продолжительность которых измерялась не только часами, но даже днями и неделями.

Наибольшую, пожалуй, опасность может представить одновременный пробой изоляции на разных фазах двух приемников тока, имеющих одинаковые защитные заземлители. Тогда, независимо от абсолютной величины сопротивлений растеканию заземлителей корпусов, на каждом из них появятся напряжения прикосновения, равные половине линейного. Опасность таких аварий практически сводится к нулю в тех случаях, когда несколько приемников тока имеют один общий заземлитель; при таких условиях в результате одновременного пробоя на корпус изоляции двух различных фаз появится ток короткого или почти короткого замыкания, и установка отключится. Фактически, напряжения, появляющиеся на корпусах приемников тока, окажутся значительно ниже половины линейного напряжения. В тех случаях, когда сопротивления заземляющих проводов, соединяющих оба приемника тока, равны сопротивлению линейных проводов, потенциал каждого

из корпусов по отношению к земле не превзойдет $1/6$ линейного напряжения.

В системах с изолированными нулевыми точками опасность попасть под напряжение, близкое к линейному, реальна только при весьма маловероятном падении оборвавшегося провода непосредственно на хорошо заземленный предмет и одновременном с этим прикосновении человека к другому проводу.

В свое время одним из основных мотивов введения системы 380/220 В с заземленной нулевой точкой служила необходимость экономии металла, а также желание включать в одну и ту же сеть электродвигатели, работающие при линейном напряжении 380 В, и лампы, работающие при фазном напряжении 220 В по отношению к земле.

Однако широкое распространение короткозамкнутых электродвигателей, каждое включение которых сопровождается миганием ламп, заставило отрицательно отнестись к практике питания электродвигателей и ламп от одной и той же сети. В настоящее время при электрификации фабрично-заводских предприятий стремятся применять отдельные трансформаторы для силовой и осветительной нагрузок, отказываясь от заземления нулевых точек сетей, питающих только силовых потребителей тока.

Вполне логичным как с точки зрения экономии, так и с точки зрения безопасности является по мнению автора переход в ряде случаев с напряжения 380/220 В с заземленной нулевой точкой для питания силовых потребителей на напряжение 500 В с изолированной нулевой точкой: это позволит уменьшить расход металла в 1,7 раза. Условия безопасности при этом не ухудшаются, потому что сопротивление растеканию защитных заземлителей 20 Ω обеспечивает безопасность почти во всех случаях практики, даже при большом числе параллельно включенных групп приемников и при сравнительно широко развитых кабельных сетях. Несмотря на принадлежность по формальным признакам системы 500 В, имеющей всегда изолированную нулевую точку, к системам высокого напряжения, она на практике зарекомендовала себя, как система менее опасная, по сравнению с системой 380/220 В с заземленной нулевой точкой. Недостатком этой системы является невозможность включения ламп в силовую сеть и необходимость иметь специальные осветительные трансформаторы. Возражения, что система эта может представить очень большую опасность в тех случаях, когда при заземлении одного из линейных проводов человек прикоснется к другому линейному проводу и, таким образом, окажется под напряжением 500 В, как мы видели, недостаточно обоснованы.

В отличие от систем с изолированными нулевыми точками системы с заземленными нулевыми точками характеризуются тем, что даже в нормальных условиях работы человек, прикасающийся к любому из находящихся под напряжением линейных проводов, всегда оказывается под полным фазным напряжением. Повреждения изоляции сопровождаются как появлением больших или меньших напряжений прикосновения на корпусах приборов, так и опасными повышениями потенциала исправных линейных проводов по отношению к земле. В системе 380/220 В при напряжении прикосновения 40 В эти повышения потенциала могут достигнуть 347 В.

Поэтому аварийный режим должен быть кратко-

временным, и установка должна иметь защитные устройства, обеспечивающие отключение тока медленно вслед за аварией. Следовательно, аварийный ток I , проходящий через заземлители, должен обеспечивать мгновенное перегорание плавких предохранителей или отключение автоматических выключателей. Между тем опыт свидетельствует о том, что выключение тока при авариях происходит далеко не всегда; это объясняется очевидно, что аварии не всегда сопровождаются металлическим коротким замыканием и, следовательно, предохранители своевременно перегорают далеко не всегда. Отсюда делается понятным, почему система 380/220 В с заземленной нулевой точкой в практике зарекомендовала себя как одна из наиболее опасных.

Однако отказаться от этой системы нельзя, в частности потому, что, например, в условиях распределительных сетей в местностях, где плотность нагрузки мала, экономия материала проводов, даваемая этой системой, получается весьма значительной.

Как уже отмечалось, основным соображением, силу которого в свое время было принято решение заземлить нулевую точку, являлось желание формальному признаку отнести эту систему к числу систем низкого напряжения. Теория и опыт указывают на неправильность этого предположения, потому что линейные провода во время аварийных режимов оказываются под формально высоким потенциалом по отношению к земле.

Если по данным Эльзасского общества владельцев паровых котлов² при изолированной нулевой точке повышение потенциала линейных проводов по отношению к земле выше фазного имеет место в 7% всех аварий, то при заземленной нулевой точке такие повышения потенциала вероятны в 4% всех аварий. Следовательно, практически, обе системы с этой точки зрения почти равноценны. Поэтому автор считает вполне возможным и своевременным выдвинуть положение о целесообразности применения системы 380/220 В с нулевым проводом, но с изолированной нулевой точкой. При таких условиях однофазные и, в частности, осветительные приемники тока могут включаться между линейными проводами и изолированным нулевым проводом, а трехфазные — между линейными проводами. При этом сечение нулевого провода с точки зрения безопасности не имеет значения. Заземление трехфазных приемников тока должно осуществляться так же, как в системах с изолированными нулевыми точками. Само собой разумеется, в таких случаях подвеска нулевых проводов должна выполняться так же тщательно, как и подвеска линейных.

Возражением против выдвигаемого предложения может служить соображение о недопустимости боты осветительных приемников при формальном высоком напряжении. По мнению автора, это возражение не имеет с точки зрения безопасности никакого значения, и такие системы приемлемы для электрификации в сельских местностях.

Как известно, число несчастных случаев при высоких напряжениях значительно выше, чем при низких и потому деление напряжений на высокие и низкие ничего не говорит о меньшей опасности

² L. Müller, La mise à la terre du point neutre des réseaux triphasés en étoile à basse tension. RGE, v. XXXVI, 8, IX 1934.

низких напряжений. Больше того, отнесение тех или других напряжений к числу низких по нашему мнению лишь демобилизует внимание, потому что у многих до сего времени существует убеждение об их безопасности. Можно показать, что в системах с заземленными нулевыми точками и с нулевыми проводами наивыгоднейшие с точки зрения безопасности условия имеют место при равенстве r_0 , (сопротивления растеканию заземлителей нулевой точки) и r_1 (сопротивления растеканию защитного заземлителя). Однако задача продолжает оставаться неопределенной ввиду отсутствия данных для определения общей проводимости обоих заземлителей или их эквивалентного сопротивления.

Чтобы сделать эту задачу определенной, рассмотрим вопрос о способах обеспечения безопасности в случае перехода высшего напряжения на обмотку низшего напряжения трансформатора. В этом случае в сети высшего напряжения появляется ток, определяющийся эквивалентным сопротивлением растеканию R_s всех параллельно включенных заземлителей нулевого провода и емкостью сети высшего напряжения, или сопротивлением растеканию заземлителя нулевой точки (рис. 1 и 2).

Так как по условию нулевая точка со стороны низшего напряжения заземлена, ее потенциал по отношению к земле $U_0 = IR_s$, где I — ток заземления.

Ясно, что одновременно с нулевой точкой такой же потенциал U_0 по отношению к земле получит весь нулевой провод, а следовательно, в корпусах всех «зануленных» приемников тока. Поэтому напряжение U_0 не должно превышать 40 В. Действующие в настоящее время «Руководящие указания» допускают $U_0 = 125 \text{ В}$.

В зависимости от схемы сети высшего напряжения возможны два случая:

1. Нулевая точка источника высшего напряжения изолирована.
2. Нулевая точка источника высшего напряжения заземлена.

Предположим, что нулевая точка изолирована. При расчетах заземляющих устройств обычно задается или емкость сети или емкостный ток I_c , т. е. ток, появляющийся при коротком замыкании на землю одной фазы, когда сопротивление растеканию заземлившегося провода равно нулю. Зная емкостный ток и напряжение сети, можно найти емкостное сопротивление

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{U_n \sqrt{3}}{I_c}. \quad (7)$$

При напряжении 6600 В и емкостном токе $I_c = 100 \text{ А}$ имеем:

$$X_c = \frac{6600 \sqrt{3}}{100} = 114 \text{ }\Omega.$$

* §33 проекта «Правил» требует введения в расчет для определения сопротивления растеканию рабочего заземления (r_0) наименьшего возможного переходного сопротивления в месте замыкания на землю одного из фазных проводов в Ω . Это требование ставит проектировщиков в очень тяжелое положение, потому что более или менее близкое к истине определение этой величины недостижимо; можно говорить лишь о ее порядке. § 34 для систем с занулениями требует, чтобы потенциал нулевой точки не превосходил 65 В, независимо от того, обеспечивается или нет отключение момент аварии линии высшего напряжения.

Емкостные сопротивления X_c включены последовательно с сопротивлением R_s , в соответствии с чем ток в каждой из фаз:

$$I_{c1} = \frac{U_\phi}{\sqrt{R_s^2 + \left(\frac{X_c}{3}\right)^2}}. \quad (8)$$

Второе уравнение получим, задаваясь потенциалом нулевой точки и нулевого провода

$$U_0 = I_{c1} R_s. \quad (9)$$

Подставляя в уравнения (8) и (9) приведенные выше данные и решая их, находим $R_s = 0,40 \text{ }\Omega$ и, следовательно, при двух заземлителях нулевого

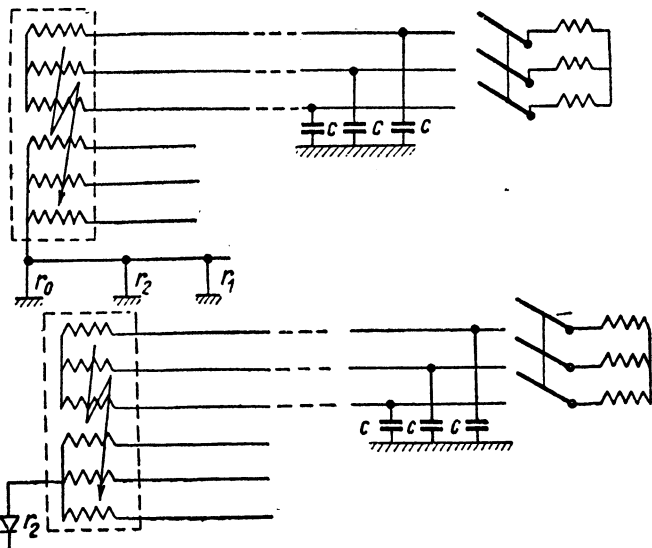


Рис. 1 и 2

провода сопротивление растеканию каждого из них должно быть 0,8 Ω . Предположив, что ток I_c задан и что эквивалентное сопротивление R_s невелико по сравнению с сопротивлением X_c , имеем:

$$U_0 = I_c R_s. \quad (10)$$

и

$$R_s = \frac{U_0}{I_c}. \quad (11)$$

При емкостном токе $I_c = 100 \text{ А}$ и $U_0 = 40 \text{ В}$ получим:

$$R_s = \frac{40}{100} = 0,4 \text{ }\Omega$$

и, следовательно,

$$r_1 = r_0 = 0,8 \text{ }\Omega.$$

В тех случаях, когда ток выключения автоматов I_a меньше тока I_c , расчет можно вести по току I_a .

Устройство заземлителей значительно упрощается при компенсированных сетях, когда в качестве расчетного можно принимать ток, составляющий 20% от полного емкостного тока.

При заземленной нулевой точке сети высшего напряжения сопротивление растеканию заземлителя нулевой точки определяется сопротивлением растеканию r_{01} заземлителя нулевой точки сети высшего напряжения.

В случае изолированной нулевой точки на стороне низшего напряжения для обеспечения безопасности необходим пробивной предохранитель. Вопрос о выборе напряжения прикосновения должен решаться теперь с учетом того, что переход высшего напряжения на обмотку низшего напряжения не сопровождается повышением потенциала на корпусах защищаемых приборов, а связан с повышением потенциала линейных проводов и, следовательно, с повышением потенциалов только изолированных частей. Такое повышение потенциала проводов представляет меньшую опасность, потому что прикосновение к ним, маловероятное в условиях нормальной эксплуатации, может считаться исключительным во время аварии. Поэтому, выбирая потенциал U_0 , следует учитывать лишь возможность повреждения изоляции. Во всяком случае напряжение 125 В не вызывает сомнений.

Проект новых „Правил“ стоит, очевидно, на той же точке зрения, допуская для систем с изолированными нулевыми точками $U_0=150$ В. Мы считаем возможным выбрать U_0 так, чтобы результирующий потенциал проводов низшего напряжения по отношению к земле не превосходил 150% от номинального. Соображения эти мы считаем возможным распространить на любые сети; например, повышение потенциала проводов сети, работающей при напряжении от 6 кВ до 11 кВ, не сможет повредить их изоляцию. Неизбежные при этом значительные повышения потенциалов на территории распределительных устройств при надлежащем устройстве заземлителей опасности не представляют.

Дальнейшие расчеты для определения r_0 следует вести так же, как в предыдущем случае.

В случае сети высшего напряжения, имеющей изолированную нулевую точку, мы, зная емкостный ток I_c , находим емкость C и емкостное сопротивление X_c , ток I_{c1} , проходящий через пробивной предохранитель

$$I_{c1} = \frac{U_\phi}{\sqrt{r_2^2 + \left(\frac{X_c}{3}\right)^2}}.$$

Если $I_c = 200$ А и $U_0 = 125$ В, то

$$X_c = \frac{6600 \sqrt{3}}{200} = 57 \Omega,$$

$$I_{c1} = \frac{6600}{\sqrt{3} \sqrt{r_2^2 + \left(\frac{57}{3}\right)^2}}$$

и

$$I_{c1} r_2 = 125 \text{ В}.$$

Решая эти уравнения, имеем:

$$r_2 = 3,96 \Omega.$$

Таким образом в данном случае обеспечение безопасности даже в некомпенсированных сетях, обладающих большой емкостью, в отличие от сетей с заземленными нулевыми точками на стороне низшего напряжения, не представляет затруднений.

Выводы: 1. Необходимо раз навсегда отказаться от деления напряжений на высокие и низкие, исключив из проекта «Правил» самые термины высокое и низкое напряжение как вредные с точки

зрения безопасности и вносящие путаницу в проектирование и в вопросы охраны труда.

2. Необходимо отказаться от деления методов расчета заземляющих устройств на две группы 1000 В и выше 1000 В и создать единую систему расчета, не зависящую от напряжения: различные методы расчета заземляющих устройств должны определяться исключительно системой трехфазного тока.

3. Необходимо установить для всех без исключения электрических установок, в соприкосновении с которыми находится большое количество работников, единое напряжение прикосновения 65 В для помещений без повышенной опасности и 40 В для всех остальных. Для замкнутых электромашиных помещений изменять действующие в настоящее время напряжения прикосновения нет необходимости.

4. Необходимо отказаться от метода выбора расчетных значений напряжений прикосновения с учетом вероятности длительного прикосновения и времени действия защиты и для всех случаев при электрификации фабрично-заводских предприятий принимать напряжение прикосновения равным 40-65 В.

5. Необходимо отказаться от требования обязательного заземления нулевых точек осветительных установок, работающих при напряжении 380/220 В с нулевым проводом и допустить применение этой системы с изолированной нулевой точкой во всех без исключения случаях, при условии монтажа нулевых проводов столь же тщательного, как и линейных.

6. Отменить действующее в настоящее время распоряжение об обязательном выборе во всех случаях для освещения фабрично-заводских предприятий напряжения 380/220 В и предоставить проектировщикам право выбора наиболее безопасной и экономически выгодной системы. В связи с применением при электрификации фабрично-заводских предприятий напряжения 500 В считать целесообразным применение трансформаторов 500/127 В.

7. Установив, что в системах 380/220 В с заземленной нулевой точкой и с нулевым проводом возможно обеспечить безопасное напряжение прикосновения, регламентировать расчет сопротивления растеканию заземлителя нулевой точки, исходя из максимального потенциала нулевой точки 40 В, могущего появиться при пробое изоляции обмоток трансформаторов и переходе высшего напряжения на обмотки низшего напряжения; сопротивление растеканию повторных заземлителей должно быть одинаковым с сопротивлением растеканию заземлителя нулевой точки.

8. Регламентировать допустимые напряжения прикосновения при переходе высшего напряжения на обмотки низшего напряжения трансформаторов 40 В в системах с заземленными нулевыми точками и с нулевыми проводами и превосходящие в 10 раз потенциал линейных проводов по отношению к земле в системах с изолированными нулевыми точками. В качестве расчетного тока принять емкостный ток системы высшего напряжения или ток выключения автоматов на стороне высшего напряжения.

9. Регламентировать применение разделительных трансформаторов для присоединения фабрично-заводских высоковольтных приемников тока 3-11 кВ к распределительным сетям, особенно линейным, обладающим значительной емкостью,

ли устройство заземлений при непосредственном присоединении к районным сетям затруднительно или технически невыполнимо.

10. Уточнить случаи, когда установки, работающие при напряжениях $110 \div 127$ В и 220 В с изолированной нулевой точкой, должны иметь зазем-

ления. Регламентировать в качестве критерия, определяющего необходимость устройства заземлителей, величину тока, вычисляемую по формулам (1) и (2). При токах выше 0,04 А заземляющие устройства обязательны, при токах меньше 0,040 А заземляющие устройства необязательны.

Использование металлических конструкций здания как заземления рабочего нулевого провода¹

В. П. ТИХОНОВ

Горьковский автомобильный завод им. Молотова

Вопрос использования металлических конструкций зданий, как сетей заземления, встает неизбежно перед каждым проектировщиком цеховых сетей, когда эти сети прокладываются в здании с металлическими или железобетонными колоннами и фермами. Выполнение сети заземления или зануления, независимо от конструкций здания, приводит к тому, что по всему зданию, рядом с массивными металлическими частями здания, прокладываются полосы сети заземлений, сечения которых исчисляются десятками квадратных миллиметров.

В противовес этой кажущейся несообразности, можно указать только то, что эти полосы легко поддаются расчету, тогда как металлическим конструкциям зданий присущ ряд особенностей, вносящих много неопределенного. К ним относятся: наличие температурных швов, нарушающих и искажающих связанность всей системы, отсутствие связи между системами разных пролетов, беспрепятственные изменения сечений во всех направлениях и неоднородность соединений между собой отдельных элементов. Правда, широкое внедрение за последние годы сварки при изготовлении и сборке металлических конструкций несколько уменьшает влияние последнего фактора.

Действующие «Электротехнические правила и нормы» (§ 107) категорически воспрещают замену отдельных участков как заземляющей или зануляющей сети, так и рабочего нулевого провода конструкциями зданий. Проект «Правил устройства заземлений и занулений в установках низкого напряжения» («Электричество» № 9, 1934) в противоположность нормам разрешает такую замену заземляющей или зануляющей сети, не сопровождая это положение никакими оговорками. Вопрос же о рабочем нулевом проводе в этом проекте остается открытым. В судовых установках подобное использование корпуса судна санкционировано стандартом. Невольно возникают вопросы, насколько правильно указания действующих «Электротехнических правил и норм» и не представится ли возможным при определенных условиях пойти на подобные замены, что позволит не только снизить затраты и расход меди на нулевой рабочий провод, но и повысить надежность работы.

Основными элементами металлических конструкций здания при наиболее широком применении металла являются (рис. 1): колонны 1, связи между колоннами 2 (прогоны), фермы 3, связи между фермами 4 и прогоны, несущие кровлю 5.

Элементы 2, 4 и 5 создают проводимость вдоль здания, элементы 3 — поперек него, а элементы 1, создавая связь между фермами двух соседних пролетов, повышают проводимость поперек цеха. При железобетонных и деревянных несущих конструкциях перекрытий непрерывные массы железа отсутствуют, и вопрос об их использовании для целей заземления и зануления отпадает.

В многопролетных зданиях фермы одного пролета обычно не имеют прямой связи с фермами соседнего, и проводимость может иметь место только через колонны, на которые они опираются. При железобетонных колоннах и раздельных подушках под фермы с этой проводимостью практически нельзя считаться, и фермы двух пролетов следует рассматривать как разобщенные. При железных колоннах имеется связь между фермами двух пролетов через колонну, и величина проводимости зависит от того, насколько покрыты ржавчиной фермы и колонны.

Температурные швы также делят весь массив металлических частей здания на отдельные части, которые следует считать практически разобщенными друг от друга.

В итоге, здание сколь-нибудь значительных размеров в отношении проводимости будет представлять комплекс отдельных, практически взаимно разобщенных звеньев.

Проводимость каждого такого звена практически зависит от способа его соединения, так как сечения отдельных элементов, ферм, связей и колонн весьма велики и их сопротивлением можно пренебречь. Соединения при помощи сварки, при правильном исполнении обеспечивают проводимость места сварки не ниже целого места. Склепывание и сболчивание практически производится уже при окрашенных, а иногда и покрытых ржавчиной конструкциях и место соединения представляет значительное сопротивление.

В свете изложенного выше представляется совершенно очевидным, что проводимость металлической конструкции здания в целом, как и было указано ранее, не может быть определена расчетно. Поэтому целесообразно ознакомиться с опытными материалами по определению сопротивления металлических конструкций² зданий отдельных цехов ГАЗ им. Молотова, используемых с 1938 г. в качестве сетей зануления, и на основе анализа этих материалов сделать выводы.

² Колонны — железобетонные, кроме колонн корпусов, сооруженных из железа.

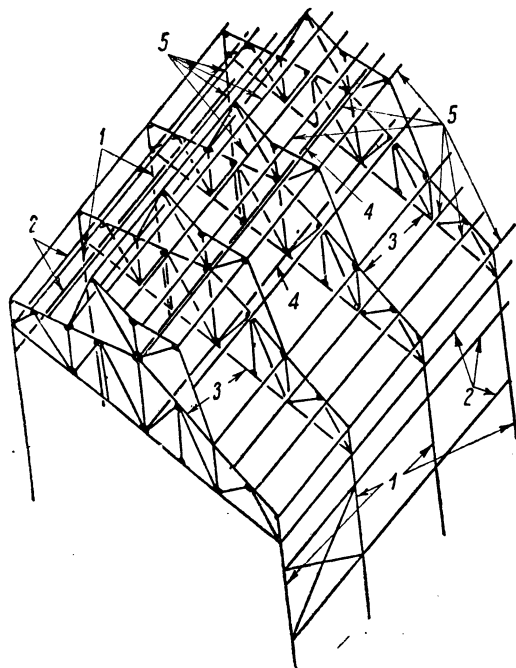


Рис. 1

Краткая характеристика используемых конструкций приведена в табл. 1

Таблица 1

Характеристика цепи тока

№ кривых на рис. 2	Литер корпуса	Число разрывов конструкций		Длина пути тока, м			Примечание
		температур. швы	между пролетами	в плане по прямой	в плане по ортогоналям	спуски в сумме	
1	A	4	4	261	322	18,5	Перемычки поставлены не на всех разрывах. Кроме конструкций проложена сетка из полосового железа под шашкой. Сетка колонны имеет шаг не 6 м, а 12 м, а фермы стоят через 6 м на специальных продольных фермах. Спуск
2	A	2	4	119	166	18,5	
3	A	1	4	110	154	18,5	
4	B	2	4	155	218	27	
5	B	2	4	170	236	27	
6	C	0	6	105	144	20	Никаких перемычек нигде не поставлено
7	C	1	6	92	108	20	
8	C	2	6	136	192	20	
9	D	1	2	79	111	15 + ?	
10	E	4	1	136	192	?	

Для обеспечения проводимости между отдельными звеньями конструкций в используемых конструкциях были предусмотрены перемычки по температурным швам — во всех звеньях, и между отдельными пролетами — только в цехах с железобетонными колоннами. Испытания проводились электролабораторией отдела главного энергетика ГАЗ им. Молотова методом нагрузки от вспомогательного трансформатора токами порядка 250—300 А (с целью максимального приближения к условиям практической работы конструкций здания, как цепи зануления). В качестве вспомогательных проводов для нагрузки и измерительных приборов использовались питающие фидера. Результаты ис-

пытаний в виде кривых представлены на рис. 2. Рассмотрение этих кривых позволяет сделать выводы.

Кривые изменения полного и активного сопротивлений по своему характеру аналогичны та же кривым для отдельных железных проводов. При некотором значении тока имеет место повышенное значение импеданса, постепенно спадающее. В отдельных случаях имеют место горбы кривые (кривые 1, 2 на рис. 2, а), что объясняется преобладающей ролью в общем сопротивлении для какого-то значения тока одного из участков различного сечения.

На испытанных участках максимум значения сопротивления (полного, активного и реактивного) лежит в области токов ниже 120 А для всех случаев, а для большинства оно ниже 80 А. При токах выше 120 А имеет место во всех случаях снижение или постоянство импеданса.

Полученные кривые активного сопротивления (рис. 2, а) могут быть разбиты на 3 группы: высокие значения сопротивления (кривые 1, 2, 3) — арматурно-радиаторному корпусу, что может быть объяснено далеко не достаточным количеством перемычек; средних значений сопротивления (кривые 6, 7, 8, 9 и 10) в цехах с наличием металлических колонн и дополнительных ферм, связывающих основные; низких значений сопротивления (кривые 4 и 5 по цеху мотора № 2), что может быть объяснено прокладкой под шашкой довольно густой сетки из железных полос для удобства заземления корпусов станков тщательным выполнением перемычек. Как общий вывод, можно сказать, что вполне достижимы значения активного сопротивления порядка $0,04 \div 0,07 \text{ }\Omega$ при токах $200 \div 400 \text{ А}$.

Импеданс во всех экспериментально найденных кривых (рис. 2, в) лежит в пределах $0,16 \div 0,08$ при токах $200 \div 400 \text{ А}$, при условии хорошего выполнения перемычек (что не было выполнено для кривых 1, 2, 3). При тщательном выполнении можно считать достижимым импеданс $0,06 \div 0,1$ для токов $200 \div 400 \text{ А}$.

Необходимо теоретически и экспериментально проработать вопрос о сопротивлении металлических конструкций зданий и путях тока по ним при токах нагрузки до $600 \div 800 \text{ А}$.

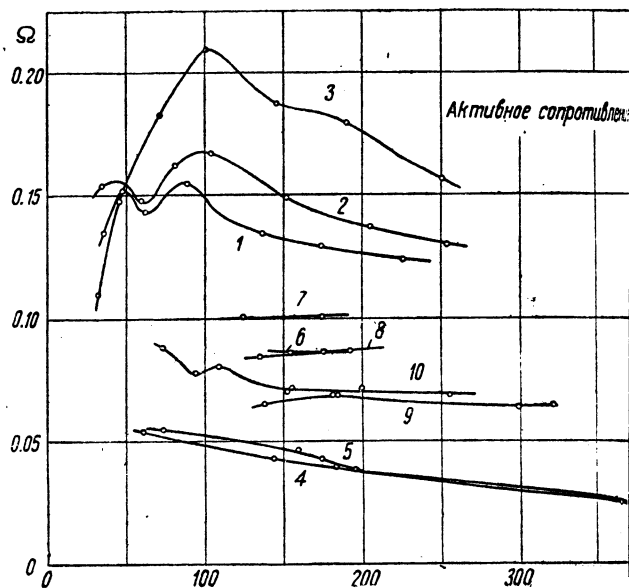


Рис. 2а

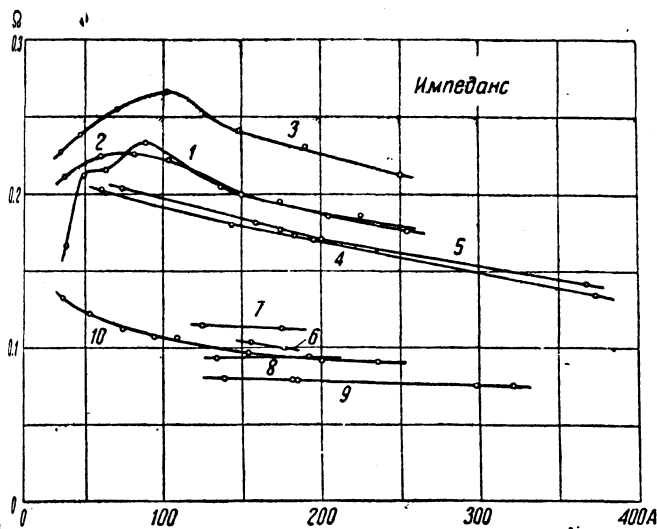


Рис. 2б

Конструкции цехов промпредприятий, в зависимости от степени уверенности в их непрерывности, можно разбить на 4 категории.

Первая категория — конструкции, непрерывность которых безусловно может быть обеспечена, и, следовательно, пригодные к использованию в качестве замены защитного и рабочего нулевых проводов и отдельных сетей заземления. К этой категории можно отнести только железные фермы перекрытия и подкрановые пути.

Вторая категория — железные колонны зданий, для которых характерно наличие слоя краски и ошавчины на поверхностях соприкосновения с другими металлическими конструкциями, а также характерен обычный способ соединения (клепкой и болтовой), не дают уверенности в осуществлении хорошего электрического контакта, затем — общецеховые магистрали пара, отопления, сжатого воздуха, холодной и горячей воды, имеющие прокладки во фланцевых соединениях. Эту категорию можно использовать лишь в качестве дополнительных защитных проводников заземления и зануления.

Третья категория — конструкции, непрерывность которых, вообще говоря, достаточная, может быть нарушена без ведома и согласия работников электрохозяйства (например, при частичной реконструкции или рационализации производства) — металлические фундаменты под оборудование, конвейеры и рольганги, бункеры и трубопроводы производственного назначения. Возможность их использования — та же, что и категории второй. Кроме того, их можно применить и в качестве основных защитных проводников заземления и зануления корпусов непосредственно на них расположенных электродвигателей и пусковых приборов, при условии их непрерывности и надежного соединения с основными проводниками заземления и зануления.

Четвертая категория — конструкции, непрерывность которых явно сомнительна. К этой категории принадлежат: арматура железобетонных конструкций и разного рода металлические перегородки (для создания в цехе конторок, кладовых и т. п.). Использование этих конструкций даже в качестве защитных проводников заземления и зануления бесполезно.

При использовании металлических конструкций зданий в качестве цепей защитного заземления и

зануления могут быть предъявлены два требования: напряжение прикосновения при токах отключения автомата или перегорания плавких предохранителей не должно превышать 65 В в обычных производственных помещениях и 40 В в помещениях с повышенной опасностью. Как видно из рис. 3, это требование практически удовлетворяется, а из изложенного можно заключить, что диапазон токов, при которых оно удовлетворяется, может быть расширен. Второе требование сводится к достаточной термической устойчивости при токах короткого замыкания. Правила и нормы IX ВЭС (§ 22) считают для этой цели достаточным железный проводник сечением 100 мм². Практически же, по соображениям получения достаточной проводимости, сечение наиболее слабых мест — перемычек, значительно превышает этот минимум, поэтому вопрос термической устойчивости следует в данном случае считать не актуальным.

К рабочему нулевому проводу предъявляется как основное требование, чтобы падение напряжения, вызванное небалансированным током, не превышало известных пределов. В случае использования металлических конструкций в качестве нулевого рабочего провода только в распределительной сети, в удовлетворении этого требования можно быть всегда уверенным, как это видно по результатам исследований, проведенных в одном из цехов ГАЗ им. Молотова (табл. 2).

При использовании конструкций зданий как нулевого рабочего провода питательной сети дело обстоит несколько сложнее. Обычно расфазировка однофазных потребителей (группа ламп), включаемых между нулем и фазными проводами, достаточно совершенна, и вряд ли может идти речь о токе небаланса, превышающем 40—50 А.

Можно сделать следующие выводы по вопросу использования металлических конструкций зданий как нулевого рабочего провода.

Для мелких однофазных потребителей (лампы и однофазные вентиляторы) такое использование представляется возможным.

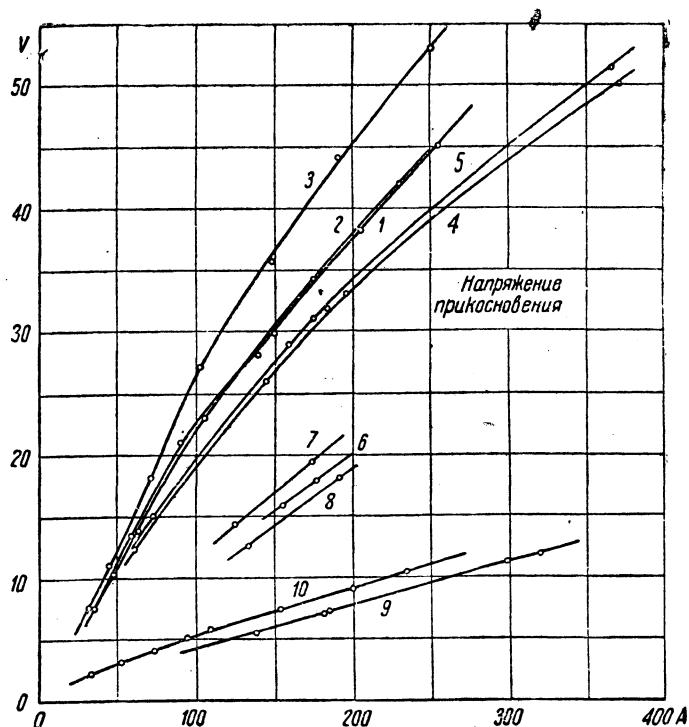


Рис. 3

Таблица 2

Напряжения	Обычная распределительная сеть	Нулевой провод заменен конструкцией здания
Напряжение на групповом щитке, V	233	232
Напряжение у наиболее удаленной линии, V	227,8	229,7
Потеря напряжения, V	5,2	2,3

Особое внимание должно быть обращено на получение достаточной проводимости соединения металлических конструкций здания с нулевой шиной подстанций. В отдельных случаях следует пойти на то, чтобы это соединение (длиной порядка 10—15 м) выполнять медным проводом, и тем сэкономить четвертую (нулевую) жилу по всей сети.

Возможность присоединения крупных однофазных потребителей (электропечи, трансформаторы и машины контактной сварки) представляется сомнительной.

Рассматриваемое использование зданий сопряжено с некоторыми опасными явлениями. При недостаточной проводимости зданий, а тем более — при нарушении их непрерывности неизбежно появление на них напряжений, значительно отличающихся от напряжения земли, и, следовательно, возникает опасность поражения током для всех лиц, стоящих на земле и касающихся этих конструкций.

При нарушениях нормального режима силовой и осветительной сетей в виде замыкания фазы на землю (нуль), ввиду падения напряжения в сети заземления (зануления), напряжение нулевого провода вблизи места аварии смещается. При этом однофазные потребители, включенные между фазными проводами и нулем, оказываются в ненормальных условиях, что может на них отразиться.

При прохождении тока по металлическим конструкциям возможны действия на них тока — тепловые, химические и т. п., что может вредно отразиться на их целостности.

При нарушениях нормального режима в силовой и осветительной сети в виде однофазного замыкания на землю по заземляющей системе протекает ток короткого замыкания и вызывает в ней падение напряжения. При правильно рассчитанной и выполненной системе заземления (зануления) это падение не может превышать длительно 65 V. Кратковременно, до момента перегорания плавких предохранителей или отключения фидерных автоматов, допустимы и большие значения. Длительность подобных режимов практически не может превышать 1,5—2 sec.

Подобного рода падение напряжения вызывает смещение нулевой точки вблизи места аварии.

В наиболее неблагоприятном случае в сети 380/220 V возможно длительное смещение нулевой точки на 65 V. Кратковременный же разрыв (1,5—2 sec) мыслим со смещением нулевой точки на 200 V. Это сопряжено (при $\cos \varphi = 0,7$ у потребителей) с повышением напряжения однофазных потребителей в первом случае до 130%, во втором — до 73%.

Такого рода повышения не вызывают существенных опасений. Опыт работы временной сети освещения в одном из цехов ГАЗ им. Молотова с использованием конструкций здания в качестве нулевого провода в течение нескольких месяцев в 1939 г. позволяет сказать, что, несмотря на значительное количество коротких замыканий, влияние существенно не ощущалось.

Явления коррозии теоретически вполне возможны, так как при неполном контакте и наличии окислов меди всегда можно ожидать выпрямляющего действия в отдельных местах цепи нулевого провода. При этом выпрямленный ток может идти по тому пути, который никак нельзя предусмотреть. Ток может проходить по конструкциям зданий, по трубопроводам, по земле и в отдельных местах может дать электролитический эффект, где этого зачастую нельзя и предусмотреть.

Предотвратить подобное явление можно только одним способом, — обеспечить полную изоляцию только рабочих проводов, но и рабочего заземленного провода. Видимо, этими соображениями объясняется требование § 21 «Руководящих указаний для установок 380 V», чтобы изоляция рабочего нулевого провода была такая же, как и фазного. Казалось бы, что все это говорит противпустимости использования металлических конструкций здания как цепи рабочего нулевого провода. Однако, как мы указывали, ток небаланса по подстанции в целом обычно не превышает 40—50 A. Считая для ориентировки с грубым преувеличением, что 25% будет выпрямлено и растечется, имеем общую утечку за год (8760 h) 43 800 Ah. Подобное количество электричества вызовет разложение 30,6—44,3 kg железа — величина весьма скромная по сравнению с естественной коррозией. Следует ожидать, что напряжение, при котором будет иметь место подобные явления, невелико — порядка не более 2—3 V.

Тем не менее было бы ошибкой пренебречь этим явлением, так как легко может случиться, что коррозия проявит себя как раз там, где ее меньше всего будут ждать. Поэтому явления коррозии требуют к себе постоянного внимания и им должно быть уделено значительное место в общей программе изучения вопроса. В данный же момент вопросы экономии меди настолько актуальны, что можно и необходимо пойти на разрушение некоторого количества железа, чтобы сэкономить металл. Необходимо только знать, где будет происходить это разрушение, его предвидеть и парализовать вредные последствия.

К вопросу о воздействии электрического тока на человеческий организм¹

Л. П. ПОДОЛЬСКИЙ

Москва

Прохождение электрического тока по проводникам всякого рода, как известно, сопровождается нагревом. Прохождение тока через растворы приводит, кроме того, к электролизу, т. е. к расщеплению молекул электролита. Человеческое тело состоит из твердых проводников, полупроводников и растворов. При прохождении тока через тело имеет место как выделение тепла, так и электролитическое разложение крови и других жидкостей, пропитывающих ткани и заполняющих сосуды.

Какое же из указанных воздействий обуславливает поражение?

Если принять, что сопротивление тела человека составляет примерно 1500Ω и что через него пройдет ток силой $0,1 \text{ A}$ при длительности прохождения 1 sec , то окажется, что количество выделившейся теплоты составляет всего лишь 15 W/sec или $3,6$ малых калорий. Само собою разумеется, что выделение в человеческом организме такого ничтожного количества теплоты ни в какой мере объясняет возникновение тех тяжелых последствий, которые в большинстве случаев влечет за собой прохождение через тело человека тока порядка $0,1 \text{ A}$.

Необходимо отметить, что эффективность электролиза за время процесса поражения в количественном отношении также ничтожна: например, при постоянном токе в $0,1 \text{ A}$ длительностью в 1 sec , электролиз воды сопровождается выделением только около $1,5 \text{ mg}$ водорода. Смертельная доза сильнейших ядов превосходит это количество. Однако раздражающее действие продуктов электролитического расщепления крови и других жидкостей, находящихся в организме человека, на нервную систему не подлежит сомнению.

Электролиз имеет место не только при прохождении через тело человека постоянного тока, но и при прохождении переменного тока, если только частота последнего не превосходит определенного предела. Объясняется это тем, что выделившиеся в определенных местах за время одного полупериода (при обычной промышленной частоте 50 Hz — $0,01 \text{ sec}$) частицы не полностью вступают во взаимодействие с частицами противоположного знака, выделяющимися в тех же местах, во время того полупериода. Эти частицы могут в той или иной степени образовать новые соединения, растворяться или же уноситься системой кровообращения, оставаясь некоторое время в свободном состоянии.

При весьма значительной частоте, электрический ток уже не оказывает на нервную систему немедленного эффекта. Как известно, при применении гальванизации через человека в целях глубинного прогревания тканей пропускаются высокочастотные токи порядка нескольких ампер. Безопасность этих токов объясняется, повидимому, тем, что при больших частотах электролитические воздействия противоположного характера имеют незначительную

длительность и расщепления молекул либо не происходит вовсе, либо освобождающиеся ионы немедленно соединяются с ионами, выделившимися в течение предыдущего полупериода и вновь образуют исходное вещество, не успев оказать специфического раздражающего действия на нервную систему. Кроме того, токи высокой частоты вытесняются в связи с явлением поверхностного эффекта из внутренних частей тела, и поэтому ток минует места с большими сосредоточенными сопротивлениями, где происхождение больших токов могло бы вызвать недопустимое повышение температуры (сочленения и т. п.).

Отсчеты по амперметру при переменном токе не могут непосредственно служить характеристиками эффективности процесса электролиза за один полупериод, так как амперметр показывает среднее квадратичное значение тока, между тем как количество продуктов разложения зависит от среднего арифметического значения величины тока за полупериод. Последняя величина при синусоидальном токе меньше первой в $1,11$ раза.

Некоторые авторы [4] в качестве измерителя, определяющего эффективность прохождения тока через человеческое тело, предлагают принять количество электричества (в кулонах), протекающего через тело за время поражения, причем при переменном токе оно определяется путем умножения количества электричества, протекающего за полупериод, на число полупериодов, в течение которых прохождение тока имело место.

С такой точкой зрения нельзя согласиться. Если бы опасность прохождения тока, при прочих равных условиях, определялась бы исключительно количеством свободных ионов или ионов, образовавших вредные для здоровья химические соединения, то постоянный ток оказывал бы более сильное воздействие, чем переменный, так как при одинаковом количестве электричества, протекающего через электролит, количество выделяющихся продуктов электролиза при постоянном токе несомненно значительно больше, чем при переменном частотой 50 Hz . Между тем, наоборот, переменный ток (по крайней мере при напряжениях до 500 V) опаснее, чем постоянный. Очевидно, что значение имеет не только количество электричества, но и длительность прохождения тока: так например, по некоторым литературным данным [9] ток силой $0,1 \text{ A}$, частотой 50 Hz опасен только в том случае, если он длится более $0,2 \text{ sec}$. Во всяком случае вряд ли ток в $0,01 \text{ A}$ длительностью в 4 sec обладает той же степенью опасности, как ток в $0,1 \text{ A}$ в течение $0,4 \text{ sec}$, хотя в обоих случаях количество электричества остается одинаковым.

Вообще трудно ожидать, чтобы соотношение между раздражающим фактором и производимым им в человеческом организме эффектом могло бы быть выражено при помощи элементарного уравнения первой степени.

Таким простым соотношениям не удовлетворяют за пределом упругости даже деформации, с кото-

¹ Некоторые положения статьи Л. П. Подольского редакция считает дискуссионными.

рыми мы сталкиваемся в сопротивлении материалов. Несомненно, что и в данном случае реакции человеческого организма подчиняются значительно более сложным законам, чем простая пропорциональность количеству протекшего электричества.

Большая опасность для человека переменного тока по сравнению с постоянным при одинаковом напряжении и одинаковой длительности протекания может быть объяснена следующими причинами: при переменном токе максимальное мгновенное значение тока поражения в $\sqrt{2}$ раза больше, чем при постоянном; при переменном токе имеют место повторные воздействия противоположного знака с частотой, равной частоте тока. В качестве грубой аналогии можно привести специфическое действие нагрузок противоположного знака на материалы, приводящее к «усталости» материала и его разрушению.

Прохождение тока через человеческое тело сопровождается либо ослаблением (вплоть до паралича) деятельности нервных центров, от которых зависят жизненные функции организма, либо, наоборот, кратковременным усилением ее. При параличе нервов, управляющих дыханием, сердце может некоторое время продолжать свою работу. Если время не будет упущено и к искусственному дыханию будет приступлено до полного прекращения деятельности сердца, то пострадавший может быть возвращен к жизни.

Alvensleben [6] считает возможным за низшую границу величины смертельного тока при обычных путях его в организме принять 0,1 А, основываясь на исследованиях несчастных случаев со смертельным исходом, которые произошли на включенных воздушных линиях, находящихся под воздействием линий высокого напряжения. Эти случаи представляют большой интерес, так как они поддаются точному анализу путем расчетов и измерений. Наименьшее значение установленного этим путем смертельного тока составляет 0,11 А. В одном несмертельном случае, сопровождавшемся, однако, потерей сознания, выявленная величина тока поражения составляла 0,04 А.

Само собой разумеется, что имеющиеся в литературе данные об экспериментах, касающихся воздействия электрического тока на человеческий организм, в основном, относятся к токам, сравнительно безопасным для человека. Ниже мы приведем результаты некоторых из этих экспериментов.

1. До сих пор не потеряли интереса опыты, произведенные проф. Weber над самим собой еще в 1897 г. [11].

Электродами каждый раз служили две проволоки, к которым подводилось напряжение и которые Weber охватывал руками. Подводился переменный ток частотой 50 Hz. Напряжение регулировалось ступенями через 10 V. Условия этих опытов хотя и не соответствуют обстановке, имеющей место в обычных условиях эксплуатации электрических установок, однако, они пригодны для характеристики воздействий на человека различных токов. Результаты экспериментов следующие:

Влажные руки. Напряжение — 10 V: слабое дрожание пальцев; ток 1 mA.

Напряжение — 20 V: очень сильное сокращение мускулов; руки легко освобождаются; ток 2—2,4 mA.

Напряжение — 30 V: обе руки, включая и плечи, почти парализованы; освободить руки можно лишь с трудом; очень сильные боли в пальцах и руках;

ток терпим не более 10 sec; величина тока — 15 mA.

Напряжение — 40 V: обе руки полностью парализованы; боли нестерпимы; освободить руки не удастся; выносимо не более 5 sec; ток 19—22 mA.

Напряжение — 50 V: все мускулы пальцев и парализованы; боль нестерпима, произвести оттока не удалось. Дальнейшее повышение напряжения при влажных руках не производилось из-за опасное для жизни.

Сухие руки. Напряжение — 10, 20 и 30 V: никакого, либо весьма слабое воздействие; величина тока вследствие ее незначительности измерить не удалось.

Напряжение — 40 V: слабое шекотание в пальцах; величина тока попрежнему ничтожна.

Напряжение — 50 V: слабое сокращение мускулов пальцев и кисти; ток — меньше 0,1 mA.

Напряжение — 60 V: сокращение мускулов кисти и предплечья, ток около 0,8 mA.

Напряжение — 70 V: сильное сокращение мускулов рук, включая и локти; двигать ими затруднительно; ток — 1,8 mA.

Напряжение — 80 V: воздействие значительно сильнее, чем при 70 V; руки до локтей онемели; сильная боль; освободить руки можно лишь при особом усилии; ток 9—11 mA.

Напряжение — 90 V: руки полностью парализованы; освободить их невозможно; боли нестерпимы (экспериментатор не мог удержаться от крика); при обратном переходе к напряжению 80 V воздействие показалось несравнимым с воздействием при 90 V.

2. Freiberger [1] производил опыты над 25 людьми. Ток, как и у Weber, пропускаться от руки к руке, причем испытуемые накладывали руки на электроды (а не охватывали их). Оказалось, что пороговый ток менее 6 mA почти нечувствителен. Между 8 и 15 mA — слабая чувствительность (ощущение нагрева). При 20 mA возникает судорога в мускулах предплечья.

При переменном токе ощущения значительно сильнее. Уже при 3 mA возникает слабый, а при 6 mA сильный зуд. Судорога появляется при 12 mA.

3. В Швейцарии производились опыты над 25 людьми [10] путем пропускания тока от руки к руке. Опыты показали, что ощутимым является ток, начиная от 0,8 mA. При 3,5—4,5 mA появляется боль; при 4—5 mA судорога в руках; при 4,5—5,5 mA — судорога достигает предплечья, при 8—9,5 mA — верхней части рук, а при 11—12 mA — плечей. При 13—14 mA — освободить руки можно лишь с трудом, а при 15 mA не удастся. Ток силой 15 mA можно выдержать лишь 15 sec. Подчеркивается, что ощущения различных людей в сильной степени совпадали. Характерно, что при токе порядка 15 mA даже у людей, у которых в связи с характером работы, кожа на руках толстая и мозолистая, выступил на руках пот.

4. В Физико-техническом институте в Берлине производились опыты над 76 мужчинами и 26 женщинами, имевшие целью установить наименьшую величину переменного тока, кратковременное воздействие которого вызывает испуг. Далее определялась сила тока, при которой испытуемые просили дальнейшее увеличение тока приостановить. При этом переменный ток частотой 50 Hz пропускался от руки к руке. Испытуемые прикасались к электродам, не охватывая их. Сигналом «первого испуга» считалось выражение лица, сопровождаемое

являлись восклицания и т. п. Оказалось, что не менее чем половина испытуемых ощутила «первый испуг» при токе до 0,5 А (наибольшая величина около 2 мА). Около половины возражали против увеличения тока свыше 1 мА (наибольшая величина составляет также около 2 мА).

5. Аналогичным испытаниям при переменном токе 60 Нз были подвергнуты в Электротехнической лаборатории в Нью-Йорке 28 женщин и 48 мужчин [3]. В отличие от германских испытаний, где имело место лишь дотрагивание к обоим электродам, в Нью-Йорке опыты производились при левой руке, опущенной в слабый раствор соли. Были обследованы следующие виды прикосновений правой рукой к металлическому электроду: дотрагивание, схватывание большим и указательным пальцем, охватывание. Кроме того, испытания производились также при условии погружения не только левой, но и правой руки в раствор соли. Данные американских опытов сведены в таблицу.

Значения наименьшего ощущаемого тока в мА

Род прикосновений	28 женщин			48 мужчин			Общие средние значения для всех испытуемых
	средн. знач.	наибольш. знач.	наим. знач.	средн. знач.	наибольш. знач.	наим. знач.	
дотрагивание	0,27	0,4	0,2	0,4	0,8	0,2	0,34
схватывание	0,59	1,2	0,2	0,87	2,4	0,26	0,76
охватывание	0,84	1,4	0,5	1,19	3,0	0,26	1,05
погружение	0,88	1,8	0,3	1,39	3,0	0,44	1,18

Таким образом при дотрагивании ощутимы токи, составляющие только $\frac{1}{3}$ от токов, ощутимых при схватывании.

Производились также испытания на наибольший ток (при одной руке, погруженной в раствор, и при схватывании второй рукой второго электрода), причем средние значения составляют: для женщин 5,15 мА, для мужчин — 8,35 мА, а по всем испытуемым 7,1 мА. «Рекордное» значение для мужчин составило 20 мА, а для женщин 8,8 мА. Само собой разумеется, что испуг, связанный внезапным прохождением электрического тока, является для нервной системы добавочной нагрузкой, значение которой различно для разных людей, также и для одного человека, но в разных ситуациях.

Отдельно следует остановиться на действии больших токов (например силой 1 А и более), имеющих иметь место лишь в случаях прикосновения к токоведущим частям высокого напряжения. Существует мнение, что при поражениях токами большой силы своевременное производимое искусственное дыхание имеет больше шансов на успех, чем при поражениях относительно небольшими токами (порядка десятых долей ампера). Предполагается, что при больших токах деятельность сердца немедленно замирает, сохраняя способность к восстановлению, как только прекратится прохождение тока. При малых же токах остановки сердца предшествуют сильные и неправильные его

сокращения, что снижает вероятность восстановления деятельности сердца, даже при условии своевременного применения искусственного дыхания.

Из опытов над животными упомянем об экспериментах Konwenhoven и Langworthy над крысами [7]. Такие опыты представляют интерес, разумеется, не в отношении абсолютных величин токов поражения, а лишь в отношении общих выводов о воздействии электрического тока на животный организм. Эксперименты над крысами показали, что при низких напряжениях равной величины переменный ток более опасен, чем постоянный. Однако при напряжении 1000 В, наоборот, более опасным оказался постоянный ток. Во всяком случае, тяжесть поражений возрастает с увеличением силы тока (с увеличением напряжения, приложенного к испытуемому животному).

Что касается опасности из-за значительного выделения теплоты в организме человека, то согласно указаниям Freilerger [2] это имеет место лишь при мощности в 12 кВт и более, что при сопротивлении тела в 1000 Ω соответствует току по меньшей мере в 3,5 А.

Из изложенного выше следует: переменный ток начинает ощущаться человеком при 0,5 мА, при 2—8 мА появляется боль, а при 12 А резко выраженная судорога. Постоянный ток порядка от нуля до десятых долей ампера менее эффективен, чем переменный.

Индивидуальные различия значительно меньше, чем можно было бы ожидать, исходя из существующих по этому вопросу мнений. Попытки к оживлению путем применения искусственного дыхания должны производиться во всех без исключения случаях, и они имеют шансы на успех, если сохранилась хотя бы весьма слабая сердечная деятельность.

Практический интерес представляет следующий вопрос: изменяется ли эффективность воздействия электрического тока на человеческий организм приблизительно одинаково на всем диапазоне величин возможных токов поражения, имеются ли «критические точки», при приближении к которым, несмотря на незначительность изменения величины тока, эффективность резко изменяется?

Такие точки не представляют большого интереса в диапазоне токов, не опасных для человека, хотя в отдельных случаях все же и в этом диапазоне они могут представлять интерес. Например, наименьшая величина ощущаемого тока может понадобиться при установлении норм изоляции пола или рабочих площадок в тех случаях, когда обслуживание установки требует прикосновений к токоведущим частям, находящимся под напряжением (электролитические установки). Критические точки за пределами, где начинается диапазон смертельных токов, могут представлять интерес при установлении вероятности успешного исхода попыток оживления людей, пораженных током.

Но наиболее актуальным является вопрос о наличии «критических точек» для всего диапазона токов, в пределах которого опасность колеблется от легких до смертельных поражений. Этот вопрос имеет большое значение для того, чтобы уяснить значение мероприятий, направленных к относительно небольшим снижениям токов поражений или, что то же самое, к относительно небольшим снижениям величин напряжений прикосновений. К таким мероприятиям в сетях низкого напряжения относится прежде всего целесообразный выбор распре-

деления энергии (заземленная или изолированная нейтраль), что может быть связано с увеличением или уменьшением токов поражения при нормальных режимах изоляции в пределах 10—30%.

Играет ли это серьезную роль?

К сожалению, для ответа на этот вопрос нет особенно богатого материала. Но все же кое-что можно заключить из описанных выше экспериментов. Например, Weber в опытах, относящихся к сухим рукам, подчеркивает, что воздействие при 90 V совершенно несравнимо с воздействием при 80 V. Freiburger указывает на то, что при 15 mA постоянного тока имеет место лишь слабый эффект, а при 20 mA — явно выраженная судорога. Из швейцарских опытов следует, что при 13—14 mA переменного тока освободить руки, охватывающие электрод, возможно, а при 15 mA не удастся.

С весьма большой долей вероятности можно предположить, что, если бы провести опыты над воздействием электрического тока на различные жизненные функции человека, то критических точек оказалось бы столько же, сколько изучаемых функций. Такие точки мы получили бы при установлении величин токов, при которых приостанавливается дыхание, при которых останавливается сердечная деятельность, наступает потеря сознания и т. д.

Для наших целей несущественно относились ли бы эти критические точки ко всем людям вообще или же разнились ли бы в зависимости от пола, возраста, профессии, состояния здоровья и т. п. Для того чтобы ответить на вопрос, могут ли от-

носительно небольшие изменения токов поражающе дать существенный эффект в отношении снижения травматизма, нам достаточно констатировать, что в диапазоне токов между легкими и смертельными поражениями существует большое количество «критических» значений, относящихся к различным функциям человеческого организма и к различным категориям людей. Поэтому можно утверждать, что такие вопросы, как заземление или же не заземление нейтрали для вопросов безопасности в сетях низкого напряжения, являются весьма существенными.

Литература

1. Dr.-Ing. H. Freiburger. Der elektrische Widerstand menschlichen Körpers gegen technischen Gleich- und Wechselstrom. Berlin, 1934.
2. H. Freiburger. Neuere Vorschungen auf den Gebiet elektrischen Unfalls. „Die chemische Fabrik“ № 3/4, 1936.
3. Zimmermann. Die Empfindlichkeit des Menschen gegen Elektrisierung und ihre Bedeutung für den Bauelektrischen Gesamt-Elektrizitätswirtschaft, № 17, 1933.
4. Holstein Ratulou. Über die Stromverhältnisse augenblicklichen tödlichen elektrischen Unfällen, 1936.
5. Alberschönberg. Über die Empfindlichkeit des menschlichen Körpers für schwachen Wechselstrom. ETZ, № 40, 1932.
6. Alvensleben. Physiologie und Technik der elektrischen Betätigung. ETZ., № 31, 1933.
7. W. B. Konwenhoven, O. K. Langworthy. Fund Research in Injuries from electric Shock. El. Eng. okt. 1932.
8. Vieweg. Einige Versuche über Schreckwirkungen bei Durchgang kleiner Wechselströme durch den menschlichen Körper. Elektrizitätswirtschaft № 15, 1933.
9. О. Лебиль. Заземление, зануление, защита выключателями.
10. Bull. Sev. Bd 20, 1929, стр. 428, ETZ, стр. 254, 1930.
11. Bull. Sev. Bd 19, стр. 703, 1928, ETZ, стр. 291, 1930.

Вопросы технико-экономического проектирования

Обобщенный метод выбора оптимальных параметров энергетических установок¹

С. А. КУКЕЛЬ-КРАЕВСКИЙ

Москва

При проектировании энергетических установок и систем очень часто приходится определять оптимальную величину какого-либо параметра, увеличение которого влечет за собой прирост единовременных затрат денежных средств (капитальных затрат) и материалов (иногда остродефицитных), но зато снижает потери электрической энергии прямо или косвенно. Таковы задачи выбора сечения провода линии электропередачи, выбора диаметра или живого сечения водоподводящих сооружений гидростанций, в которых получается потеря напора и многое другое. К тому же типу задач приводится выбор мощности гидростанции при заданных гидротехнических сооружениях и выбор объема водохранилища (потеря энергии через водослив). Во всех этих случаях на выбор влияют ожидаемые условия эксплуатации проектируемого сооружения в системе, отражающиеся прямо или косвенно на показателе использования мощности и себестоимости электроэнергии станции, покрывающих потери.

Так как эти исходные показатели никогда не

могут быть заданы точно и так как имеется возможность при проектировании наметить возможные пределы изменения этих технико-экономических факторов, желательно во всех случаях иметь экономичную характеристику, изображающую графически зависимость оптимальной величины параметра от величины исходных показателей.

Такая характеристика позволит планирующим и проектирующим органам принять сознательное окончательное решение, учитывая также, конечно, это нужно, конъюнктурные условия периода сооружения установки и общие интересы развития народного хозяйства.

Во всех случаях, когда практически решается задача выбора величины параметра, имеется какой-нибудь параметр, минимальный по техническим соображениям, требующий возможного минимума единовременных затрат на проектируемое сооружение, и только экономические соображения заставляют его повышать.

В условиях социалистического хозяйства необходимо всегда рассматривать проектируемое сооружение не изолированно, а как элемент

¹ В порядке обсуждения. *Ред.*

народнохозяйственного комплекса, в который оно включается. Повышение параметра, если оно снижает потери, может в другой части того же комплекса снизить не только ежегодные издержки производства, но и капитальные затраты.

Обычно потери по мере роста параметра уменьшаются с убывающей скоростью, и потому выгоды от их снижения при изменении параметра на одинаковую величину уменьшаются, тогда как затраты, связанные с увеличением параметра, растут либо равномерно, либо с увеличивающейся скоростью. В результате имеется лимит для повышения параметра, за пределами которого суммарные одновременные затраты достигают минимума и затем при дальнейшем росте повышаются. То же самое имеет место с суммарными издержками производства, которые снижаются при росте параметра с убывающей скоростью и достигают до минимума, после достижения которого увеличение параметра явно нецелесообразно.

Добиваясь минимально возможного значения ежегодных расходов производства в системе в целом, мы в то же время должны оправдать вложение каждого последнего рубля, каждого килограмма металла.

Поэтому допустимо повышать параметр только до тех пор, пока единовременные затраты денежных и материальных ценностей на это повышение не станут явно чрезмерными, почему нам необходимо иметь показатель или, вернее, группу показателей соотношения единовременных и ежегодных затрат. Такие показатели мы обозначаем буквой T с различными индексами. Каждая величина T показывает, ценой каких единовременных затрат (например рублей, кг цветного металла, кВт·ч электроэнергии на его выплавку и др.) получается единица экономии в ежегодных затратах (например рублей или электроэнергии, или топлива в покрывающих потери станциях). В тех случаях, когда мы сопоставляем таким путем однородные величины (например рубли или киловатт-часы, единовременно затрачиваемые и ежегодно экономленные), показатель T имеет размерность времени и показывает некоторый промежуток времени в годах, что не лишает его основного значения показателя соотношения единовременных и ежегодных (или вообще периодических) затрат [1].

Можно показатель T получить как отношение конечных разностей при изменении параметра от минимального (x_0) до намечаемого (x_1) — это будет средняя величина, но в нашем случае она сама по себе никакого значения иметь не может. Так как при повышении параметра от x_0 до x_1 экономии ежегодных затрат постепенно увеличивается и может в конце участка быть очень медленным, мы можем получить хорошее среднее значение T даже тогда, когда под конец наименьшее увеличение параметра было явно нецелесообразным. Поэтому для нашей задачи важно строить показатель T обязательно в форме отношения бесконечно-малых приращений единовременных затрат к бесконечно-малым приращениям ежегодных расходов при увеличении величины параметра x на бесконечно-малую величину т. е.²

$$T' = \frac{dK}{dI} \quad (1)$$

можно пользоваться показателем соотношения затрат

При составлении выражения (1) величины K и I должны представлять суммы затрат (единовременных или ежегодных), зависящих от параметра x как проектируемого сооружения (K_x или I_x), так и энергетических установок, покрывающие потери, т. е. в электрических станциях и соответствующие части электрических сетей (K_n или I_n).

Разнообразные задачи, к решению которых применим предлагаемый нами и изложенный ниже метод, могут быть сведены к двум типам:

а) Исходной величиной для определения оптимальной величины параметра x является связанные с его изменением потери мощности, которые могут быть выражены в виде $\Delta P = f(x)$. Сюда относятся задачи на выбор сечения провода длинных и мощных электропередач, диаметра или живого сечения водоподводящих сооружений гидростанций, в которых появляется потеря напора и в конечном счете потеря электрической мощности; задачи о выборе оптимального к. п. д. или $\cos \phi$ приемников электроэнергии с точки зрения суммарных затрат единовременных³ и ежегодных в систему в целом, включая электростанции, сети и проектируемые приемники и т. п.

б) Исходной величиной являются потери электроэнергии, например, когда параметром, подлежащим определению, является сама мощность электрической установки N . Сюда относятся задачи на выбор мощности гидростанции при заданных основных гидротехнических сооружениях. К этому же второму типу сводится и задача определения оптимального сечения провода или диаметра водоподводящего сооружения гидростанции, когда почему-либо в число единовременных затрат не включаются капитальные затраты на электростанции, покрывающие потери. Эти последние затраты до настоящего времени не принимаются во внимание в учебниках, вышедших в свет до 1939 г. включительно, но это теоретически допустимо только для коротких и маломощных линий, где потери мощности относительно очень малы. Однако для целой сети, состоящей из таких линий, а также для таких мощных и длинных линий, как будущие линии электропередачи от Куйбышевского гидроузла в центр и на Урал, капитальные затраты, связанные с покрытием потерь мощности, столь велики, что их игнорировать в расчетах никак нельзя.

Рассмотрев общий метод решения обоих типов задач и приведя решения к одному и тому же виду, мы покажем, как легко можно перейти от формул для первого типа задач к формулам для второго типа, и наоборот.

1. Предположим, что на основании проектных данных мы можем получить непосредственно или графическим путем следующие зависимости

$$K_x = F(x) \text{ и } \Delta P = f(x).$$

и в другой форме, — обратной принятой нами, т. е. $\frac{dI}{dK} = \frac{1}{T'} = e$. В такой форме автор пользовался этим показателем

в своей старой работе 1929 г. («Бюллетень Днепро-Днепрострой» № 1 и 2, 1929). В настоящее время автор пользуется обоими видами соотношения, как будет видно дальше, но при выводе своих формул предпочитает пользоваться именно в виде T' , т. е. цены каждой единицы экономии ежегодных затрат.

³ Затрат денежных или затрат цветных металлов.

Из последнего выражения можно получить также выражение потерянной энергии $\mathcal{E}_n = h_n f(x)$, если h_n — показатель числа часов максимальных потерь мощности является переменной, не зависящей от параметра (x), и задается условиями эксплуатации⁴.

Составив выражение функциональной зависимости от параметра x суммы единовременных и суммы ежегодных затрат в систему, зависящих от параметра x , и взяв первые производные от этих величин, мы можем написать следующее общее выражение для показателя соотношения прироста единовременных затрат (в данном случае денежных) и прироста ежегодных затрат для случая положительного изменения (т. е. увеличения) параметра x на dx ;

$$K_{\text{сум}} = F(x) + K_N f(x) \quad \text{и} \quad \text{и}_{\text{сум}} = pF(x) + Sh_n f(x);$$

$$T' = \frac{dK}{dI} = \frac{F'(x) + K_N f'(x)}{pF'(x) + Sh_n f'(x)}, \quad (2)$$

где K_N — стоимость установленного kW или MW электростанций, покрывающих потери мощности, а p — доля ежегодных отчислений на амортизацию и ремонт⁵.

Мы выразили в формуле (2) цену, за которую покупается дополнительный прирост ежегодных затрат в систему, зависящих от параметра x в виде функции по существу двух переменных: параметра x и стоимости киловатт-года потерь Sh_n , причем последняя всецело зависит от условий эксплуатации проектируемого сооружения как элемента системы:

$$T' = \psi(x, Sh_n).$$

Как видно из выражения (1), величина T' положительна в тех случаях, когда сумма единовременных затрат и сумма ежегодных затрат при увеличении параметра x изменяется в одну и ту же сторону. Это имеет место в двух случаях:

а) Когда величина параметра вызывает перерасход и суммы единовременных и суммы ежегодных затрат — в систему, а следовательно, когда такое увеличение явно невыгодно: dK и dI оба положительны. В этих случаях с экономической точки зрения параметр x обязательно должен быть снижен.

б) Увеличение параметра вызывает экономию и в единовременных и в ежегодных затратах в систему в целом, а следовательно, увеличение x явно выгодно и с экономической точки зрения необходимо. В обоих случаях положительное значение показателя T' отмечает, что величина x , при которой этот показатель получен, явно не является оптимальной — она либо слишком велика, либо слишком мала, тогда как численная величина показателя T' в этих случаях практического значения для нашего анализа не имеет.

⁴ Если h_n — сама функция от x , задача сведется к разобранному ниже второму типу. Обычно в курсах электрических сетей величина h_n обозначается буквой τ .

⁵ Во всех случаях применения нашего метода мы предполагаем, что себестоимость включает, кроме прямых издержек, только отчисления на амортизацию и на ремонт, соответствующие фактическому среднему износу за весь срок службы. Применяя для целей сравнения показатель T , обратная величина которого является по существу долей капитальных затрат, мы все же считаем возможным включать в себестоимость только долю амортизации. В формулу (2) вошли только те элементы годовых издержек производства и передачи электроэнергии в энергетическом комплексе, которые зависят от изучаемого параметра x .

Вопрос о выборе оптимальной величины параметра возникает только в случаях, когда имеется антагонистическое изменение суммы единовременных и суммы ежегодных затрат в систему, т. е. когда показатель T' отрицателен.

В этих случаях показатель T' представляет собой срок компенсирования перерасхода затрат одного рода экономией затрат другого рода.

Все, что мы только что сообщили о значении показателя T' , относится и к тому случаю, когда показатель T построен не для бесконечно-малого приращения параметра dx , а для конечной величины Δx независимо от величины этого приращения.

Экономической характеристикой изучаемого сооружения как элемента системы в зависимости от параметра x может служить семейство линий (рис. 1), построенных для различных значений (изолинии T') в диаграмме (x, Sh_n), причем себестоимость киловатт-года принимается за переменную независимую. Такую диаграмму легко построить по формуле (3), задавшись различными значениями x и T' .

$$Sh_n = \frac{(1 - T'_p) F'(x) + K_N f'(x)}{f'(x) T'}.$$

При этом для всех значений T' , кроме 0 и одного значения себестоимости киловатт-года будут соответствовать две величины x — одна при положительном T' , другая при отрицательном. Мы уже отмечали, что практическое значение будет иметь только вторая величина.

При $T' = 0$ мы получаем одну граничную линию, которая соответствует согласно формуле (1) случаю, когда сумма производных единовременных затрат в числителе равна нулю. В тех задачах, которые мы изучаем, значение x , превращающее в нуль первую производную, дает минимум функции, — в данном случае минимум единовременных затрат. Назвав через x_0 соответствующую величину параметра, мы можем определить его величину в каждой конкретной задаче, решив уравнение

$$\left. \begin{aligned} F'(x_0) &= -K_N f'(x_0) \\ \text{или} \\ -\frac{F'(x_0)}{K_N f'(x_0)} &= \Phi(x_0) = 1. \end{aligned} \right\}$$

Отсюда видно, что величина x_0 не зависит

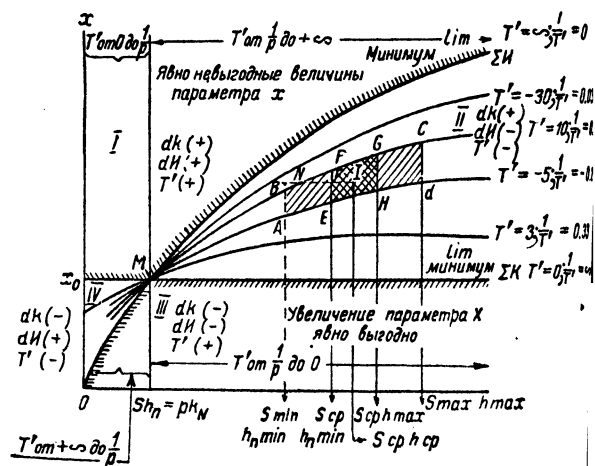


Рис. 1. Пример пользования экономической характеристикой

себестоимости киловатт-года, и потому изолиния $T'=0$ есть прямая, параллельная оси абсцисс.

При $T'=\infty$ мы получаем вторую граничную изолинию, которая соответствует согласно формуле (1) случаю, когда сумма производных в знаменателе равна нулю. Во всех наших задачах это соответствует минимуму ежегодных издержек производства в систему⁶.

Назовем соответствующую величину параметра x_{∞} .

В наших расчетах естественно не предусматривается начисление процентов на оплату капитала. В этом случае получается тот лимит для x , превышение которого всегда влечет за собой ежегодный перерасход в издержках производства в систему:

$$\left. \begin{aligned} pF'(x_{\infty}) + Sh_n f'(x_{\infty}) &= 0; \\ -\frac{F'(x_{\infty})}{f'(x_{\infty})} &= \frac{Sh_n}{p}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Изолиния $T'=\infty$ начинается в начале координат и пересекается с изолинией $T'=0$ в очень характерной точке M , ордината которой равна x_0 , а абсцисса $Sh_n = pK_N$, как легко убедиться, решая совместно уравнения (4) и (5), так как в ней $x = x_{\infty}$.

Легко доказать, что в точке M пересекаются две изолинии T' . На рис. 1 отмечены только те, которые соответствуют отрицательным значениям T' за исключением ординаты точки M , которая сама представляет изолинию положительного $T' = 1:p$.

Пересечение двух граничных изолиний для $T'=0$ и $T'=\infty$ разбивает диаграмму на четыре характерные зоны.

В первой зоне dK , dI и T' — все положительны. Эта зона — экономически абсолютно невыгодна для выбора параметра x , так как лежащая в ней величина явно преувеличена, и снижение ее всегда выгодно. В третьей зоне dK и dI отрицательны, T' опять положителен. В этой зоне величина x с точки зрения экономики системы в целом явно занижена, и увеличение ее явно выгодно. Однако имеется существенная разница в положении в зоне I: здесь нельзя говорить об абсолютном запрещении применять полученное значение параметра x , так как увеличение его, вызывая снижение суммарных капитальных затрат в систему, все же увеличивает расход тогда остродефицитных материалов в проектируемое сооружение, вследствие чего иногда возможно появление экономической необходимости ограничиваться величиной параметра x в зоне III по конъюнктурным соображениям, не говоря уже о возможной иногда технической необходимости. Но такой случай, надо полагать, будет очень редок.

В зоне II лежат наиболее обычные случаи решения многочисленных задач, рассматриваемых нами пока в самом общем виде. Здесь dK положительно, dI отрицательно и T' отрицательно, изменяясь от 0 до $-\infty$.

На рис. 1 пучок линий, лежащих во второй

Вторая граничная изолиния дает для задач по выбору числа проводов ту же величину параметра x , которая дается по формуле Кельвина, применяемой с 1881 г., величину p включить проценты на капитал, как это делается в капиталистических условиях.

зоне и проходящих все через точку M в IV зону, представляет собой семейство изолиний сроков окупаемости в пределах от 0 до $-\infty$. Если известна величина себестоимости киловатт-года и задан срок окупаемости дополнительных капитальных затрат (точнее „последнего“ вложенного рубля), мы можем легко по приведенной на рис. 1 характеристике определить оптимальную величину x , которая равна отрезку ординаты, соответствующей заданному Sh_n от абсциссы до точки пересечения с изолинией заданного срока окупаемости.

Характеристика наглядно показывает, как изменяется оптимум при изменении исходных показателей Sh_n и T' .

Обычно при проектировании невозможно точно предусмотреть величины себестоимости киловатт-года, которая зависит от многих условий. Сомножитель ее S зависит от того, какие именно станции системы будут покрывать потери⁷. Этот показатель в сильнейшей степени зависит от стоимости топлива, если покрывает потери паровая станция, или от величины капитальных затрат на один мегаватт-час, если покрывает потери гидростанция. Величина S может изменяться даже в неизменных ценах в течение срока службы проектируемого сооружения. Другой сомножитель h_n зависит от режима эксплуатации сооружения и изменяется в разные годы (например для гидростанции в зависимости от водности) и в разные периоды за время службы сооружения. Поэтому в период проектирования сооружения надо путем соответствующего планово-экономического анализа наметить вероятные пределы изменения величин и построить показатели крайние $S_{\min} \cdot h_{\min}$, $S_{\max} \cdot h_{\max}$ и средние $S_{cp} h_{cp}$, наметив затем положение соответствующих ординат на характеристике.

Не менее трудно задать определенную величину для показателя окупаемости, т. е. в данном случае для той максимальной цены одновременных затрат, которой можно покупать последний рубль дополнительной экономии.

Однако имеется один естественный верхний лимит — это срок службы сооружения (точнее не всего сооружения в целом, а того элемента, параметр которого определяется).

Как правило, мы должны стремиться к тому, чтобы вся сумма затрат живого и овеществленного труда была минимальной за срок службы, который мы обозначим через $T_{ам}$ (без штриха, так как берем этот показатель в данном случае не для бесконечно-малого приращения как раньше, а для всей части сооружения, зависящей от x). Выразителем всей суммы затрат общественного труда будет сумма затрат на сооружение и эксплуатацию (включая текущий ремонт и капитальный ремонт, как возмещение естественного износа за срок, принимаемый всегда более или менее приближенным и условно в основу исчисления амортизационных норм). Учитывая попрежнему только затраты, зависящие от величины

⁷ Если передается в систему гидроэнергия, то она вытесняет по распоряжению диспетчера системы выработку паровых станций, наименее экономичных с народнохозяйственной точки зрения, т. е. с учетом не только стоимости энергии, но и рода сжигаемого на них топлива; увеличение потерь влечет за собой снижение этих возможностей, что и должно быть учтено при выборе величины S .

параметра x , получим:

$$\Sigma(K + IT) = K_x + K_N \Delta P + p K_x \cdot T_{ам} + Sh_n \Delta P T_{ам}$$

или в общем виде

$$\Sigma(K + IT) = F(x) + K_N f(x) + p F(x) \cdot T_{ам} + Sh_n f(x) \cdot T_{ам}. \quad (6)$$

Эта сумма, выраженная в виде функции от параметра x , будет минимальная при таком значении x , которое превращает в ноль первую производную, т. е.

$$F'(x) + K_N f'(x) + p F'(x) T_{ам} + Sh_n f'(x) T_{ам} = 0, \quad (7)$$

откуда

$$T_{ам} = \frac{F'(x) + K_N f'(x)}{p F'(x) + Sh_n f'(x)} = -T'. \quad (8)$$

Из сопоставления формул (8) и (2) вытекает правило: при выборе экономического параметра сооружения с целью сведения к минимуму суммы единовременных и ежегодных затрат за все время существования той части сооружения, параметр которой определяется, необходимо принимать срок T' равным сроку амортизации. Экономически нецелесообразно повышать параметр x за этот лимит и, учитывая тяжесть единовременных затрат, следовало бы выбирать T' в пределах от 0 до $T'_{ам}$.

В тех случаях, когда мы не можем задаться какой-нибудь определенной величиной основного экономического аргумента Sh_n , а задаемся некоторыми пределами его изменения (такое положение будет иметь место почти во всех случаях проектирования), надо требовать, чтобы избранная величина x лежала не выше, чем точка пересечения ординаты минимального Sh_n с изолинией, соответствующей сроку амортизации⁸. Для случаев, когда мы имеем дело с остродефицитными материалами, например, при выборе сечения проводов, мы предлагаем задаваться сроками T' от 5 до 10 лет. Тогда мы выделяем площадку, ограниченную двумя ординатами для крайних значений аргумента, — себестоимость мегаватт года и двумя изолиниями — 5 и 10 лет. Центр этой площадки (точка 1 рис. 1) дает наиболее близкое к оптимальному значение параметра x при возможных в течение службы сооружения изменениях основного экономического аргумента.

Надо будет только проверить, что проходящая через центр площадки горизонталь пересекает ординату для минимального значения (точка N рис. 1) не выше, чем точка пересечения с изолинией срока амортизации. В последнем случае надо выбрать параметр x , соответствующий крайней ординате S_{min} h_{min} с изолинией $T_{ам}$.

Вообще же выбор исходной величины T' , или, точнее, границ для него, зависит в конечном счете от народнохозяйственных соображений и

нельзя задаваться одними и теми же для разных областей проектирования и для разных этапов развития хозяйства.

В общем случае, кроме рассмотренных трех зон, имеется еще небольшая четвертая, в которой dK отрицательно, dI положительно и T' отрицательно. В эту зону мы попадаем при проектировании, когда $Sh_n < p K_N$. Такие случаи невозможны, когда мы имеем дело только с одной станцией, покрывающей потери, так как, если стоимость киловатт-года и стоимость установленного киловатта относится к одной и той же станции, то минимально возможное значение стоимости киловатт-года составляет $p_N K_N$, где p_N — доля амортизационных отчислений на элементарной станции, которая на практике будет обычно равна или меньше доли отчислений для проектируемого элемента, параметр которого выбирается. В этих случаях ордината, проходящая через точку M , является осью ординат нашей характеристики, и часть ее, лежащая левее, не реализуется. Но в системе по существу K_N и Sh_n не связаны между собой, и потому в этих случаях возможно существование четвертой зоны, в которой должны находиться все изолинии равной окупаемости той зоны, но расположены в обратном порядке.

Мы имеем дело с выбором параметра в четвертой зоне, когда очень мало число h_n (например для резервных линий) или очень мало S (например в районах с избыточной гидроэнергией). В этих случаях, естественно, мы поставим перед собой обратную задачу, чем во второй зоне: мы будем стремиться не к минимуму издержек производства, а к минимуму капитальных затрат хотя бы за счет некоторого увеличения ежегодных расходов. В этом случае срок T' должен быть не меньше нормированный, и во всяком случае не меньше, чем срок амортизации. Если он равен сроку амортизации, то окажется, что перерасход ежегодных издержек вследствие перехода через вторую граничную линию компенсирует достигнутую первоначально экономию в единовременных затратах к моменту полной амортизации сооружения. Следовательно, сбалансирован счет прибылей и убытков, тогда при меньшем сроке компенсирования останутся в конечном счете перерасход по сравнению с нормальным для меньшего сечения. В четвертой зоне нормально должно быть соблюдено соотношение: $-T_{ам} > T' > -\infty$.

На рис. 1 был показан вид экономической характеристики, построенной непосредственно для изучаемого сооружения. Однако имеется возможность так составить исходные уравнения, что во всех решительных случаях практического применения нашего метода, чтобы показатели Sh_n и T' были собраны в одном множителе, совершенно не имеющем в своем составе каких бы то ни было величин, позволяющих изданного индивидуального элемента и могущего быть общим множителем для всех аналогичных задач. Такой прием позволяет отделить экономический показатель для выбора параметра от всех технических, придать ему универсальное значение, роль простейшей модели экономической характеристики и математическое выражение размерного показателя.

Из формулы (2) мы получим для зон с ор-

⁸ Могут быть случаи, когда условия работы сооружения продиктуют другой максимальный срок окупаемости, чем срок амортизации. Например, в случае выбора диаметра тоннеля Ульяновской гидроэлектростанции, строившейся в районе, в котором будет через несколько лет дешавая энергия гидроэлектростанций Большого Иртыша, было бы нерационально принимать срок окупаемости больший, чем число лет до момента подачи в этот район электроэнергии от Усть-Каменогорской гидроэлектростанции. При расчете линий передач возможен случай, когда через несколько лет данная линия перестает быть питательной, а перейдет на роль резервной маневренной линии. Тогда предельный срок окупаемости должен быть взят, учитывая возможное время наступления этого коренного изменения условий эксплуатации.

ельным T' :

$$-\frac{F'(x)}{K_N f(x)} = \frac{Sh_n T' + 1}{p T' + 1} = \frac{Sh_n + \frac{1}{T'}}{p + \frac{1}{T'}} = C_1 = \Phi(x). \quad (9)^a$$

Из формулы (4) $\Phi(x_0) = 1$,
откуда

$$\frac{F'(x)}{K_N f(x)} = \Phi(x) = \Phi(x_0) C_1 \quad (10)$$

$$x = x_0 F(C_1). \quad (11)$$

Мы привели нашу задачу в самом общем виде к определению двух множителей x_0 и $F(C_1)$, причем первый из них вычисляется по проектным данным без всяких народнохозяйственных соображений и имеет размерность искомого параметра и физическое значение: величина параметра, при котором капитальные затраты в системе, зависящие от параметра, минимальны. Второй множитель является функцией некоторой безразмерной величины (обычно степенная функция) C_1 , зависящей как от основного экономического аргумента, так и от других экономических показателей, выбираемых по народнохозяйственным соображениям. Величина C_1 изображается графически в виде пучка прямых линий (рис. 2), который может служить экономической характеристикой, являющейся универсальной для всех задач разобранного нами в общем виде типа. В такой характеристике можно сделать построения, показанные нами при разборе рис. 1: поделить площадку между двумя ординатами и двумя изолиниями (теперь все они прямые), найти центр площадки и сделать проверку для минимального значения основного аргумента Sh_n . Теперь экономический аргумент выражен в виде отношения стоимости киловатт-года к стоимости годового киловатта. Это обстоятельство позволяет, что, пользуясь экономическим показателем C , мы выбираем оптимум, практически независимый от колебаний цен, которые у нас имеют довольно значительны на протяжении ряда лет, которое мы должны иметь в виду проектировании.

Многочисленные расчеты автора для разных частей энергохозяйства показали, что относительные величины стоимостей у нас достаточно малы и что даже при сравнении показателей энергоустановок различных стран очень можно пользоваться ими в относительной форме, делая на величину средней стоимости киловатта паровой станции, принимаемую при инженерных и экономических расчетах в данной стране. Экономические показатели (стоимость киловатта станции, киловатт-часа, тонны условного топлива и др.) должны быть приняты в экономических расчетах по предлагаемому методу обязательно в ценах одного и того же года. Удобно всего принимать их для того года, в котором является проектирование. При соблюдении правила относительно сопоставимости цен параметра, базирующийся на принятых экономических показателях, останется на долгие

временно $F(C)$ — функция степенная, и зависи-

в зоне с положительным T' получаем в правой части ра-

$$(9) \frac{Sh_n K_N - 1 : T'}{p - 1 : T'} \quad (9a), \text{ в обоих случаях число лет}$$

принимается условно со знаком (+).

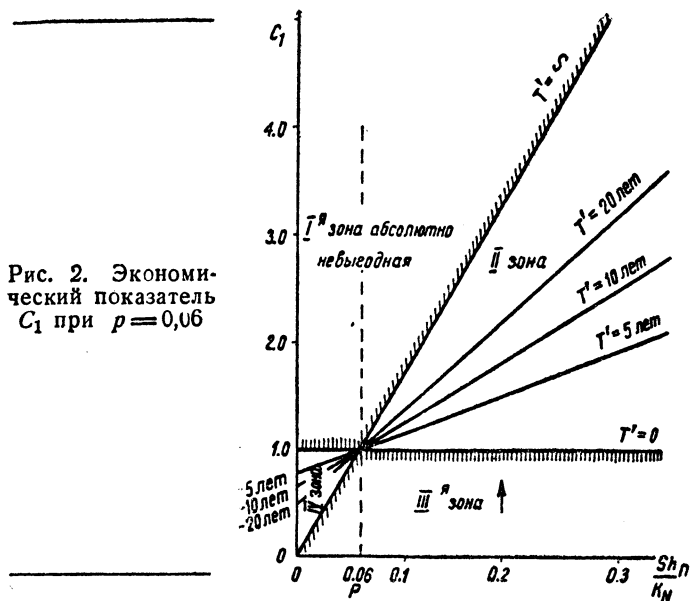


Рис. 2. Экономический показатель C_1 при $p = 0,06$

мость (11) может быть изображена так:

$$\left. \begin{aligned} x^m &= A \frac{K_N}{K_x} C_1 = x_0^m C_1 \\ x_0 &= \sqrt[m]{AK_N : K_x} \end{aligned} \right\} \quad (11a)$$

Мы получили теперь искомый параметр, точнее, какую-нибудь степень искомого параметра как произведение экономического показателя и двух множителей, из которых множитель A зависит исключительно от технических показателей частного случая¹⁰, а множитель $\frac{K_N}{K_x}$ изображает отношение удельных капитальных затрат в станции, покрывающие потери, и в изучаемое сооружение и может быть одинаковым для целой серии различных проектов.

$K_x = \frac{dK_x}{dx} = F'_x$ — во многих случаях величина постоянная (функция $F(x)$ линейная), например, при выборе сечения электропровода, когда не учитывается изменение стоимости опор при изменении сечения. Но не менее часто $F(x)$ не является линейной функцией. Тогда рекомендуется построить по точкам вспомогательный график

$$y = x^m \sqrt[m]{F'(x)} \quad (12)$$

и находить сначала

$$y = \sqrt[m]{AK_N} \sqrt[m]{C} \quad (13)$$

после чего соответствующая величина параметра x снимается во вспомогательной кривой.

2. В тех случаях, когда по каким-либо соображениям мы отказываемся от учета капитальных затрат на станции, покрывающие потери, а учитываем только издержки производства на покрытие потерь энергии, наше основное уравнение (2) принимает вид;

$$T' = \frac{F'x}{pF'(x) + Sh_n f'(x)}. \quad (14)$$

¹⁰ Например, в случаях выбора сечения электропередач А-П удельной потери мощности в MW или kW на одну цепь, 1 km и 1 mm² сечения провода [3].

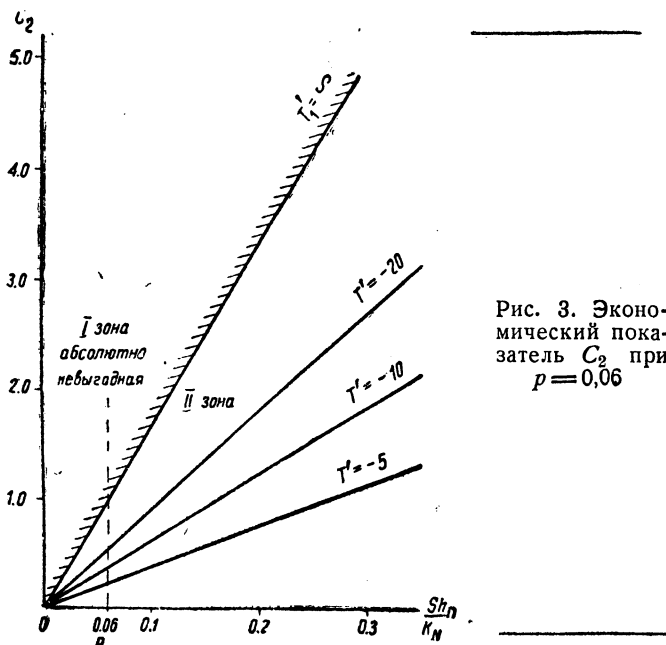


Рис. 3. Экономический показатель C_2 при $p = 0,06$

Отсюда для зон с отрицательным T'

$$-\frac{F'(x)}{KN^{f'(x)}} = \frac{Sh_n T'}{p T' + 1} = \frac{Sh_n}{p + \frac{1}{T'}}$$

или

$$-\frac{F'(x)}{KN^{f'(x)}} = \frac{Sh_n}{\left(p + \frac{1}{T'}\right) KN} = C_2, \quad (15)$$

и мы получили опять экономический показатель, но несколько другого вида.

В этом случае минимум капитальных затрат в системе совпадает с минимумом капитальных затрат в проектируемое сооружение, которое обычно имеет место при $x=0$.

Показатель C_2 может быть тоже представлен графически в виде пучка прямых (рис. 3), но имеет только две зоны: первая запрещенная, внутри которой величина C_2 явно чрезмерно велика, и вторая, в которой находим решение тем же способом, как и раньше.

Зоны третья и четвертая отсутствуют.

Мы при выводе формулы для C_2 разделили обе части равенства на KN только для того, чтобы сделать показатель попрежнему безразмерным и ввести относительные стоимостные показатели вместо абсолютных.

Из сопоставления формул (10) и (15) находим простую зависимость между обоими экономическими показателями

$$C_1 - C_2 = \frac{1}{p + \frac{1}{T'}}. \quad (16)$$

Если рис. 2 и 3 построить в одинаковом масштабе и для одного и того же значения величины p и наложить оба пучка друг на друга, совместив начало координат, то изолинии T' показателя C_1 и C_2 окажутся параллельными друг другу, а вторая пограничная линия, т. е. изолиния $T' = \infty$, будет общей для обоих показателей.

3. В тех задачах, в которых величина h_n сама является функцией от x , т. е. в задачах, где $x=N$, исходная функция $f(x)$ относится не к потере мощности, а к потере энергии.

Тогда основное уравнение (2) имеет вид

$$T' = \frac{F'(N) - K_N}{p [F'(N) - K_N] - S_T f' N},$$

где S_T — топливная составляющая себестоимости отсюда

$$-\frac{F'(N) - K_N}{f'(N)} = \frac{S_T T'}{p T' + 1} = \frac{S_T}{p + \frac{1}{T'}}$$

для зон с отрицательным T' .

Этот вид уравнения путем умножения частей равенства на произвольную величину, например h_0 , на K_N позволяет пользоваться для численного анализа тем же показателем C_2 , который изображен на рис. 3.

$$-\frac{F'(N) - K_N}{KN^{f'(N)}} h_0 = \Phi(N) = \frac{S_T h_0}{\left(p + \frac{1}{T'}\right) KN} =$$

$$\text{В этом случае } f(N) = \mathcal{E}_{\text{шдро}} = \mathcal{E}_m - \frac{A}{N^m},$$

где \mathcal{E}_m — выработка при $N = \infty$; $f'(N) = \frac{A}{N^{m+1}}$

Постоянные \mathcal{E}_m , A и m определяются применительно к проекту для изучаемого интервала возможного изменения N по трем уравнениям.

При пользовании формулой (19) нужно помнить, что вместо h_n взято произвольное число h_0 , которое должно быть введено и в левую часть равенства и что вместо S взята топливная составляющая S_T , т. е. произведение цены топлива на удельный расход его b . Во всех отраслях энергетики (в электротехнике и в теплотехнике, в гидротехнике) встречается огромное количество разнообразных задач, которые могут быть сведены к разобранным нами в общем виде. В частном применении экономического показателя C_2 , а рис. 2 и 3, построенные из параметров для соответствующей величины амортизации, нормы p , могут служить для любых задач побору параметра x , влияющего на величину мощности или потерь энергии, и представлять универсальные безразмерные показатели, не зависящие от индивидуальных проектов.

По существу мы применяем при нахождении экономического параметра, при различных условиях эксплуатации или при различных заданных значениях T' , учитывая конъюнктурные условия (какая величина временных затрат предельно допустима для достижения дополнительной экономии путем изменения параметра с удорожанием сооружения), упрощенные модели (пучки прямых вместо кривых рис. 1) экономического характера, причем выражение $x = x_0 F(C)$ является аналогом подобия для экономической характеристики модели C .

Во всех случаях очень полезно для обсуждения проекта составлять, пользуясь экономическим показателем, табличку значений искомого параметра x для различных значений T' , начиная с $T' = -\infty$ (когда соблюдено условие минимума затрат).

¹¹ Так как в формулу (17) не входит стоимость гидротехнических сооружений, не зависящих от мощности, можно принимать одинаковые нормы амортизации гидротехнического оборудования (включая и соответствующую часть сетей) и для паровых электростанций, и для гидротехнических сооружений.

требужек производства в системе) и кончая $T'=0$, где соблюдено для C_1 условие минимума капитальных затрат в систему.

Изложенный выше общий метод был применен вторым для выбора сечения проводов проекта Куйбышевских линий электропередач на 400 kV от гидроузла до Москвы и Урала, а также для решения ряда других задач.

1. Пример применения метода к выбору экономического сечения линий электропередач 400 kV от Куйбышевского гидроузла в Москву, Горький и на Урал¹². Выбрана конструкция провода — голый из алдрея АДП 600, замковый № 5. Для сечения 600 мм² (по алюминию) сделаны механические расчеты передачи и затем определена зависимость капитальных затрат от сечения, которая в рублях на 1 цепь и 1 км оказалась

$$F(q) = K_A = 38,7q + 21\,600q^{0.2}. \quad (20)$$

Второе слагаемое учитывает влияние сечения на стоимость опор и фундаментов:

$$F'_q = \frac{dK_A}{dq} = k_A = 38,7q + 4320q^{-0.8}. \quad (21)$$

Сделан электрический расчет линии при той же произвольной величине сечения — 600 мм² наружном диаметре $D=50$ мм с учетом комбинаторных устройств для ряда вариантов со ступенчатой и с блочной схемой.

По П-образной схеме замещения отдельных участков с введением поправочных коэффициентов были получены величины потерь мощности при полной и при нулевой нагрузке и потери на корону $\Delta P_{кор}$ в сырую и сухую погоду (по формуле Пика, видоизмененной Д. А. Городским).

Выбор экономического сечения проводов сделан путем последовательного приближения. Сначала выбрано сечение без учета потерь на корону предположении, что диаметр остается неизменным — 50 мм. Затем для выбранного сечения поран максимально возможный по техническим соображениям (толщина стенки) диаметр.

Пользуясь ранее определенной зависимостью потерь на корону от диаметра, определены дополнительные потери вследствие снижения величины диаметра против 50 мм в тех случаях, когда это оказалось необходимым. Разность потерь была прибавлена к исходной величине, и расход экономического сечения повторен. При этом естественно получилась большая величина сечения, чем раньше, но учитывающая влияние снижения диаметра. Если новому сечению соответствовал тот же диаметр (изменение диаметра началось скачками через 2 мм), то на этом счет для данного участка электропередач заканчивался, и параметры q и D считались окончательно выбранными. Если повышенное сечение требовало повышения диаметра D , то расчет повторялся до тех пор, пока не получалось по-

следовательно два сечения при одном и том же диаметре, после чего выбиралось наибольшее.

Только на одном участке из пяти изученных пришлось получить решение после третьего приближения, на двух — окончательный ответ получен был при первом приближении, на двух — при втором (т. е. после первой же поправки на корону). С достаточной для наших целей степенью точности можно было считать потери на нагревание независимыми от изменения потерь на корону и получить их как при максимальной, так и при нулевой нагрузке путем вычитания $\Delta P_{кор}$ из рассчитанных полных. Разность потерь на нагревание при максимальной и нулевой нагрузке считалась изменяющейся пропорционально квадрату изменения нагрузки линии.

Для определения числа часов максимальных потерь на нагревание применен следующий прием: было задано число часов использования полной максимальной нагрузки каждой линии h_A и число часов нахождения линии под напряжением — 8500 в году. Предполагалось, что режим работы линии может изменяться в пределах от наиболее равномерного в году, когда в линии остается всегда аварийный резерв, и наоборот, наименее равномерного, когда линия работает всегда либо при полной нагрузке, либо при нулевой (находится в резерве под напряжением). В первом случае показатель числа часов максимальных квадратичных потерь имеет наименьшее значение: $h_A^2:8760$, а во втором случае этот показатель имеет наибольшее значение.

Были применены следующие формулы:

$$h_{n_{мин}} = \frac{8500\Delta P_0 + \frac{h_A^2}{8760}(\Delta P_K - \Delta P_0)}{\Delta P_K}; \quad (22)$$

$$h_{n_{макс}} = \frac{8500\Delta P_0 + h_A(\Delta P_K - \Delta P_0)}{\Delta P_K}. \quad (23)$$

Для каждого участка была получена величина удельных потерь мощности Π путем деления абсолютной величины потери на произведение из числа цепей и длины линий и умножения на величину того сечения (600 мм²), при котором рассчитаны потери. Зависимость потерь мощности от сечения для нашего случая следующий вид:

$$f(q) = \frac{\Pi}{q}; \quad f'(q) = -\frac{\Pi}{q^2}. \quad (24)$$

Так как потери на отдельных участках передач измеряются десятками тысяч kW и соответствуют мощности крупной паровой станции, мы обязаны в данном случае учитывать влияние капитальных затрат в станции, покрывающих потери, и принимать экономический показатель в форме C_1 . Основное уравнение (10)

$$-\frac{F'(x)}{K_N f'(x)} = C_1$$

принимает вид для нашего случая

$$\frac{K_A \cdot q^2}{K_N \Pi} = C_1 \quad (25)$$

или

$$q = \sqrt{\frac{K_N \Pi}{K_A}} \cdot \sqrt{C_1} = q_0 \sqrt{C_1}. \quad (26)$$

Пример приводится по работе, выполненной по поручению ЦК «Теплоэлектропроект» в ноябре 1939 г. кафедрой «Электрические станции» Московского энергетического института им. Г. И. Ломоносова под руководством автора, причем электрический расчет выполнен кафедрой электрических сетей под руководством проф. А. Я. Рябкова. Выбор сечения и диаметра произведен при помощи описанного выше метода при минимизации экономического показателя C_1 .

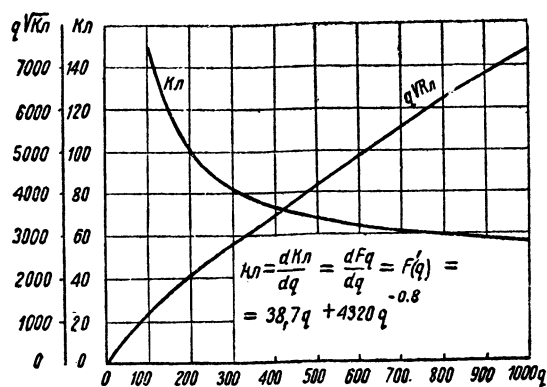


Рис. 4. Зависимость относительного прироста капитальных затрат в линии электропередачи от сечения

Вид формулы тот же, что и в простейшем случае выбора сечения провода без учета изменения стоимости опор, но k_{λ} теперь сама функция от q . Преобразуем формулу так:

$$q \sqrt{k_{\lambda}} = \sqrt{K_N \Pi} \sqrt{C_1}. \quad (27)$$

По точкам, задавая различные значения q , строим вспомогательную кривую (рис. 4):

$$q \sqrt{k_{\lambda}} = \Phi(q) = q \sqrt{38,7 + 4320q^{-0,8}}. \quad (28)$$

Для различных значений T' и собственных каждому участку величин S и h рассчитаны множители $\sqrt{K_N \Pi}$ и $\sqrt{C_1}$; по ним определено $q \sqrt{k_{\lambda}}$, а по вспомогательной кривой найдены величины q .

В табл. 1, 2 и 3 приводим* исходные данные и результаты расчета отдельных участков линий электропередач.

Таблица 1

Линии электропередач	h_{\min}	h_{\max}	$S_{cp} h_{cp}$ руб/мвт-год	Формула для C_1 при среднем Sh_n
Куйбышев—Горький (связанная схема)	3640	5800	276 000	$0,183 + \frac{1}{T'}$ $0,06 + \frac{1}{T'}$
Горький—Москва (связанная схема)	3150	5200	252 000	$0,168 + \frac{1}{T'}$ $0,06 + \frac{1}{T'}$
Куйбышев—Москва (блочная)	4850	6140	283 000	$0,155 + \frac{1}{T'}$ $0,06 + \frac{1}{T'}$
Куйбышев—Уфа	2610	4530	180 000	$0,12 + \frac{1}{T'}$ $0,06 + \frac{1}{T'}$
Уфа—Златоуст (связанная)	2260	4320	165 000	$0,11 + \frac{1}{T'}$ $0,06 + \frac{1}{T'}$

* $K_N = 1,5 \cdot 10^6$ руб/мвт; $p = 0,06$; $S_{cp} = 6$ коп/квт-ч = 60 руб/мвт-ч для центра и 50 руб/мвт-ч для Урала.

Таблица

Линии электропередачи	Число линий n	Длина линий L км	Максимальная нагрузка P_{\max} МВт
Куйбышев—Горький (связанная схема)	5	530	900
Горький—Москва (связанная схема)	4	302	628
Куйбышев—Москва (блочная)	4	830	220
Куйбышев—Уфа (связанная)	2	450	360
Уфа—Златоуст (связанная)	2	270	264

Диапазон изменения S для центра от 40 до 80 руб., для Урала—от 40 до 60 руб. дан в табл. 2

Таблица

Оптимальные параметры

	$T' = \infty$, мин. ежегодн. издержек	20	10	7,5	5	$T = 0$, мин. един. затрат	Выбран без учета потерь на корону при $D = 50$ мм	S по кой вы-рост
								q
Куйбышев—Горький	728	585	525	498	472	370	500	500
Горький—Москва	620	500	450	427	405	320	425	450
Куйбышев—Москва	824	670	588	556	492	386	550	550
Куйбышев—Уфа	560	475	445	430	424	360	450	450
Уфа—Златоуст	398	343	325	315	305	273	300	400

На рис. 5 показана экономическая характеристика, построенная для всех вариантов электропередачи. На оси ординат нанесены сечения

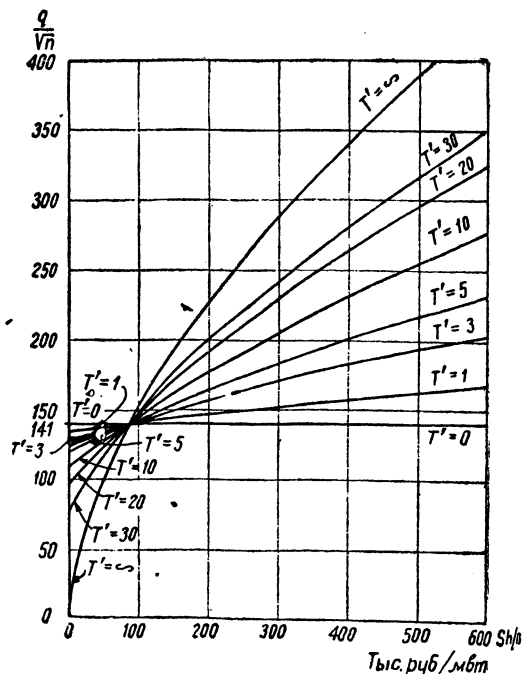


Рис. 5. Экономическая характеристика электропередачи при $K_{\lambda} = 38,7 + 4320q^{-0,8}$, $p = 0,06$, $K_N = 1,5$ млн. р.

$$\frac{q}{\sqrt{\Pi}} = \Phi(Sh_n T')$$

ленные на квадратный корень из удельных потерь. Являясь с характеристики величины ординат надо умножить на квадратный корень из удельных потерь для того варианта, для которого надо определить сечение. На рис. 6 характеристика для всех вариантов электропередач построена в другом виде: на оси ординат нанесены величины T' , а по абсциссе $q:\sqrt{P}$. Дано семейство кривых, показывающих зависимость T' от сечения для различных значений стоимости киловатт-года потерь. Эта диаграмма позволяет наметить для различных случаев величины сечения, не имея заданных пределов для T' , а руководствуясь скоростью изменения T' при изменении сечения, т. е. скоростью возрастания величины дополнительных капитальных затрат, приходящихся на один рубль дополнительной ежегодной экономии в издержках производства.

Обе диаграммы (5) и (6) дают непосредственно величину сечения для случая, когда удельные потери P равны 1 MW на 1 цепь, 1 km длины и 1 mm² сечения и являются моделью для линий данной конструкции, капитальные затраты на которые выражаются формулой $K_A = F(q) = 38,7q + 21600q^{0,2}$.

Исходя из нижеследующих данных об изменении зависимости потерь на корону от диаметра при одинаковом сечении, было вычислено, что повышение диаметра вверх 50 mm экономически целесообразно, так как дополнительная экономия в потерях не соответствует приросту капитальных затрат. Для участка 3 в сырую погоду $\Delta P_{кор}$ при $D=46$ mm — 23,2 MW, $D=48$ mm — 11,9 MW, $D=50$ mm — 5,57 MW.

Однако все расчеты, связанные с выбором экономического диаметра, в цитируемой работе носят характер только предварительных соображений, которые нуждаются в дальнейшей разработке.

Для того чтобы получить представление об абсолютных величинах одновременных и ежегодных затрат, связанных с сечением провода, приводим ниже для различных сечений провода

Таблица 4

$T' = \infty$ минимум ежегодных затрат в системе	$T' = 7,5$ лет выбранное сечение	$T' = 0$ миним. мум единовр. затрат в си- стеме	Для сравне- ния (точка в зоне III)
Сечение $q=824$ mm ²	550	386	300
Расход алюминия на 1 km и 1 цепь t 6,85	4,6	3,23	2,5
Капит. затраты, руб. на 1 km линии 114500	97 300	85 900	78 600
на станции, покрывающие потери 13 600	20 500	29 200	37 500
Итого 128 100	117 800	115 100	116 100
Издержки производства, руб. а линии (6%) 6 870	5 850	5 150	4 700
фин. потерь 3 040	4 550	6 470	8 350
Итого 9910	10 40	12 620	13 050

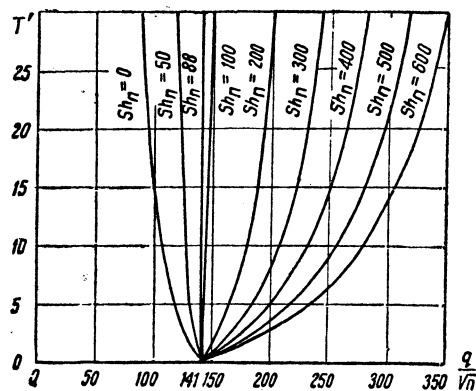


Рис. 6. Характеристика сроков компенсации прироста капитальных затрат при $K_A = 38,7 + 4320 q^{-0,8}$, $p=0,06$, $K_N = 1,5$ млн. руб/мвт

линии Куйбышев — Москва эти абсолютные показатели в рублях на 1 цепь и 1 km.

Сроки компенсации разности капитальных затрат за счет дополнительной экономии при переходе от

$$q_0 = 386 \text{ до } q = 550 \quad T = \frac{2700}{2200} = 1,22 \text{ г;}$$

при переходе от

$$q = 550 \text{ до } q_{\infty} = 824 \quad T = \frac{10300}{490} = 21 \text{ г;}$$

при переходе от

$$q_0 = 386 \text{ до } q_{\infty} = 824 \quad T = \frac{13000}{2600} = 4,84 \text{ г}^{13}$$

Для электропередачи в целом переход от выбранного сечения 550 mm² к сечению 824 mm² повлек бы за собой дополнительный расход алюминия в размере: $2,25 \times 4 \times 830 = 7470$ t стоимостью около 35 млн. руб. (не считая удорожания опор и фундаментов от повышения сечения), в результате чего ежегодные расходы снизились бы только на $490 \times 4 \times 830$ около 1,7 млн. руб.

Нерациональность доводить сечение до точки минимума издержек производства очевидна.

Для всех изученных участков линии были составлены и другие показатели T' в натуральных единицах вместо денежных, пользуясь следующими формулами.

Расход алюминия на 1 MWh экономии в потерях:

$$T'_q = \frac{\partial G}{\partial \Delta} = - \frac{g_0 q^2}{P_n h_n} = - \frac{8,37 q^2}{P_n h_n} \frac{\text{kg}}{\text{MWh}}. \quad (29)$$

Расходы алюминия на 1 t экономии в топливе

$$T'_{\Delta s} = \frac{\partial G}{\partial b \cdot \partial \Delta} = \frac{13,8 q^2}{P_n h_n}. \quad (30)$$

Срок компенсации затрат электроэнергии на дополнительную выплавку алюминия за счет дополнительной экономии в потерях энергии (считая по 20 MWh на 1 t алюминия).

$$T'_a = \frac{\partial_a \partial G}{\partial \Delta} = - \frac{\partial_a g_0 q^2}{P_n h_n} = - \frac{166 q^2}{11 h_n} \cdot 10^{-3}. \quad (31)$$

Мы убедились в том, что такие показатели могут иметь значение контрольных для учета конъюнктурных требований, но пользоваться ими гораздо менее удобно, чем ценностными: они не дают резких точек перегиба, не имея минимумов и никаких естественных лимитов. Поэтому в отличие от денежных показателей T' натуральными

¹³ Из сопоставления трех значений T явствует, что использование сроков окупаемости для выбора параметра дает правильные выводы только при исследовании срока окупаемости T' бесконечно-малых, или по крайней мере очень малых конечных приращений, что и принято в нашем методе.

можно пользоваться, только задаваясь более или менее произвольно какими-либо нормативами. В нижеследующей таблице показаны некоторые примеры.

Натуральные показатели для выбранных величин сечения провода

	q	D	T'_d kg	T'_{ds} kg	T'_a
Куйбышев — Горький	500	50	62,5	163	1,25
Горький — Москва	450	48	73,5	122	1,47
Куйбышев — Москва	550	50	60,5	83	1,22
Куйбышев — Уфа	450	48	57,0	95	1,25
Уфа — Златоуст	400	46	56,3	93,5	1,15

Первая же описанная выше вкратце работа по выбору экономических параметров линии показала возможность очень значительной экономии в цветном металле по сравнению с прежними расчетами, когда для всех участков без всяких экономических соображений принимались параметры: 600 мм² сечения по алюминию и диаметр 48 мм. Экономия от перехода на вышеуказанные сечения для отдельных участков составит в сумме до 5800 т алюминия.

2 Выбор мощности N гидростанции в случае, когда с увеличением N существенно растет выработка \mathcal{E} .

Капитальные затраты $K = F(N) - F'(N) - K_N = \Delta K$.

Потери энергии $\mathcal{E}_n = f(N) = -\frac{A}{N^2}$.

Основная формула дает:

$$N^3 = 2A \cdot \frac{K_N}{\Delta K} \cdot \frac{S_T h_0}{\left(p + \frac{1}{T'}\right) K_N}.$$

Для заданного T' можно построить мощность как функцию относительной стоимости добавоч-

ного киловатта (включая линии передач) как функцию от топливной слагающей себестоимости электроэнергии паровых станций, показывающих потери, либо как функция от стоимости условного топлива, сжигаемого на этих станциях.

Для Куйбышевского гидроузла получилось:
 $= 1400 \sqrt[3]{\frac{K_N}{\Delta K}} \sqrt[3]{C_2}.$

3. Выбор числа агрегатов гидростанции, когда с увеличением этого числа средняя годовая выработка электроэнергии \mathcal{E} остается практически неизменной и только снижается холостой расходом топлива на паровых станциях в системе, в которой дополнительные агрегаты играют роль пиковых (случай Рыбинской гидростанции при работе на Московскую систему).

Капитальные затраты (включая линии передач)

$$K = F(N); F'(N) = K_d.$$

Из основной формулы получаем:

$$\frac{K_d}{K_N} = 1 + \frac{C B_0}{\left(p + \frac{1}{T'}\right) K_N} = 1 + C_1,$$

где B_0 — холостой расход топлива паровых станций в год на 1 kW в тоннах условного топлива, C — стоимость тонны условного топлива в руб.

Решение поставленной задачи: надо выбрать максимальное число агрегатов, при котором суммарная стоимость дополнительного киловатта соответствующая стоимость на 1 kW линий передач, деленная на стоимость киловатта вытесняемой гидростанцией паровой мощности, превышает не более чем на единицу величину экономического показателя в форме C_1 , где C_1 — стоимость киловатт-года играет стоимость за холостой расхода топлива каждым киловаттом вытесняемых в пиках паровых станций. На Рыбинской гЭС такое положение имеет место в шести агрегатах по 55 MW.

ПРОБЛЕМЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОТЕРМИИ

Технические требования к конструкции печных трансформаторов

Н. И. БУЛГАКОВ

Московский трансформаторный завод им. Куйбышева

Широкое распространение электротермии для разнообразных технологических процессов обуславливает также большое разнообразие типов электрических печей и трансформаторов к ним. Достаточно будет указать, что наряду с печами, работающими с открытой вольтовой дугой, например сталеплавильными, и с печами, работающими с закрытой дугой, например, карбидного типа, имеется еще целый ряд других типов печей — индукционные, карборундовые и графитационные, нагревательные, корундовые и др.

Некоторой иллюстрацией разнообразия электротермических процессов могут служить изображенные на рис. 1—4 графики нагрузок различных

электропечных трансформаторов. На этих рисунках показано, что кампании плавок для разных печей измеряются и минутами, и часами, и сутками, и месяцами.

При применении печей одного и того же типа часто требуются различные напряжения на электродах в зависимости от того, для каких целей применяется печь — для производства карбида кальция или фосфора, или никеля и т. д.

Все это вместе взятое свидетельствует о том, что об электропечном трансформаторе как об объекте с вполне четко выраженными техническими данными говорить не приходится. Скорее можно сказать, что типов электропечных трансформаторов

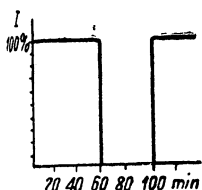


Рис. 1

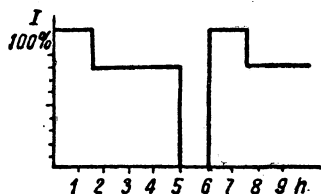


Рис. 2

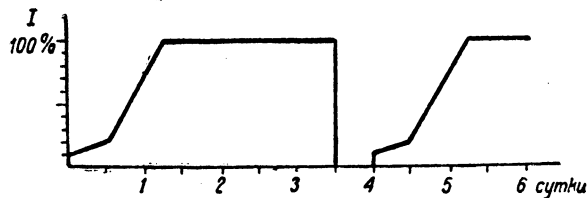


Рис. 3

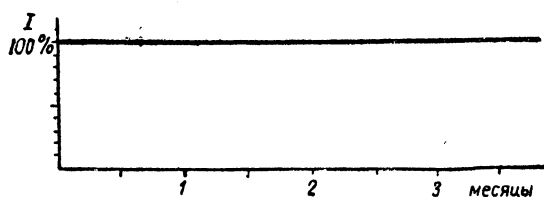


Рис. 4

имеется столько, сколько сконструировано типовых печей, умноженных, пожалуй, еще на количество различных электротермических процессов, ведущихся в каждом типе печей (сталь, ковкий чугун, фосфор и др.).

Бесспорно, что при существующей большой потребности в силовых трансформаторах вышеуказанное разнообразие типов электропечных трансформаторов является существенным тормозом в развитии электротермии. Поэтому проектирование как трансформаторов, так и всей электрической части электропечной установки («короткая сеть», электроды, распределительное устройство и т. п.) должно быть организовано в жестких рамках стандартных деталей и типов аппаратов.

Требования, предъявляемые к конструкции трансформаторов для дуговых электропечей. 1. До последнего времени довольно ярко была выражена тенденция к увеличению мощности электропечных агрегатов как у нас, так и за границей. Так известно, что в США имеются сталеплавильные печи мощностью до 100 т, в Японии — на 75 и 60 т. Весьма большое распространение получили в США, Англии и Германии печи

на 30 т с трансформаторами мощностью . . .	6000—7000 кВА
15 т	4000—4500
10 т	3000—3500

Все же наибольшее количество печей имеют мощность от 3 до 10 т. В настоящее время за границей несколько замедлились темпы повышения мощности печей, что связано, очевидно, с вопросами строительства новых цехов, освоения построенных агрегатов, потребностями выплавки больших масс стали и т. п.

Что касается печей для руднотермических процессов, то мощности 25 000 кВА были достигнуты уже сравнительно давно, но сейчас тенденция к повышению мощности недостаточно явно выражена.

Вопрос о том, является ли для нас обязательной тенденция к повышению мощностей печей, относится, с одной стороны, непосредственно к металлургии, а с другой стороны, тесно связан с общеокономическими вопросами всего народного хозяйства СССР, что подлежит отдельному рассмотрению.

2. С точки зрения механической устойчивости обмоток трансформаторы для печей с открытой и закрытой дугой находятся в различных условиях. Известно, что в процессе расплавления шихты в сталеплавильной печи происходят обвалы шихты, приводящие к значительным толчкам тока. Таких толчков тока не наблюдается в процессе работы руднотермических печей. Кроме того, из сравнения рис. 2 и 4 видно, что трансформаторы для сталеплавильных печей несравненно более часто подвержены включениям и выключениям, чем трансформаторы для руднотермических печей с закрытой дугой.

самого начала развития электротермии

трансформаторы для сталеплавильных печей защищаются дроссельными катушками, ограничивающими амплитуды толчков тока. Практика показала, что надежная работа трансформаторов, питающих руднотермические печи, возможна и без дроссельных катушек.

Кроме того, остается в силе тот факт, что ограничение величины толчка тока при помощи дроссельной катушки до 2,5—4-кратного значения номинальной величины тока сильно повышает расходы по эксплуатации печи из-за низкого значения $\cos \varphi$. Поэтому возникает стремление обойтись без дроссельных катушек, ограничив толчки тока, например, до 10-кратного значения номинального тока путем увеличения реактанса трансформатора. Этот вопрос разбивается на две части.

С одной стороны, мы встречаемся здесь с мало исследованной областью о допустимом для обмотки числе коротких замыканий. Этот вопрос имеет весьма большое значение не только для печных, но и для силовых трансформаторов. Возможно, что при решении этой задачи не придется ограничиться только теоретическими и экспериментальными исследованиями в лабораториях, но придется также вести одновременно с лабораторными исследованиями эксплуатацию опытного трансформатора.

С другой стороны, надо иметь в виду, что усиление конструкции должно в этом случае коснуться не только трансформатора, но должны быть соответственно усилены кабели, масляники, трансформаторы тока и прочая аппаратура, что может вызвать дополнительный расход цветных металлов. Поэтому должны быть произведены и экономические расчеты, т. е. сравнение увеличения капитальных затрат с экономией потерь электрической энергии.

3. Как указано выше, режим нагрузок трансформаторов для сталеплавильных печей сильно отличается от режима нагрузок для руднотермических печей, поэтому естественно было бы ожидать различных требований к термической устойчивости этих трансформаторов.

Собственно говоря, термин «термическая устойчивость» в данном случае не вполне подходящ. Вопрос сводится к нормам нагрева обмоток и к их перегрузочной способности. Однако в этом вопросе есть еще много неясностей.

В самом деле возьмем наиболее распространенные гарантии на перегрузки трансформаторов для сталеплавильных печей, а именно:

После длительной полной нагрузки:

Перегрузка 100% допустима	5 min
50%	1/2 h
25%	2 h

После холостого хода:

Перегрузка 250% допустима	10 sec
100%	1/2 h
50%	1 h
25%	4 h

Одна французская фирма гарантировала перегрузки 50% в течение 15 min, 25% в течение часа. В конце концов вопрос не в том, допускается ли перегрузка 50% в течение 15 min, или в течение большего или меньшего времени, а в том, что должны дать для эксплуатации эти нормы на перегрузки и как ими надо пользоваться.

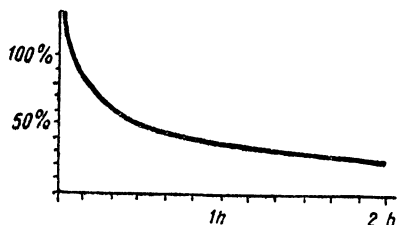


Рис. 5

На самом деле на основании приведенных выше данных можно провести некоторую плавную кривую, как показано на рис. 5. Но и эта кривая ничего не объясняет, ибо не освещены основные вопросы, а именно:

а) Какова допустимая повторяемость этих перегрузок, т. е. допустима ли 100%-ная перегрузка в течение 5 min один раз в течение часа или одной плавки, или одного дня, или одного месяца?

б) Равнозначны ли все эти перегрузки с точки зрения термической нагрузки обмоток, т. е. можем ли мы получить по первому вопросу один ответ: каждая перегрузка допустима через x часов, или же по первому вопросу должен получиться ответ в таком духе, что при длительностях, указанных на рис. 5,

перегрузка P_1 допустима один раз в $A_1 h$
 P_2 в $A_2 h$

и т. д.?

в) Далее, как надо оценить возможный срок новой перегрузки, ее величину и длительность, если предшествовавшая перегрузка длилась меньше, чем указанное на рис. 5 время?

г) Наконец, печь очень часто работает сравнительно длительное время (полчаса, час) с неполной нагрузкой. Какие перегрузки допустимы в этих случаях?

Поскольку приведенные выше гарантии на перегрузки или кривые по рис. 5 не могут дать ответа на эти вопросы, то на основании этого можно ясно представить себе всю неправильность технического определения перегрузок, данных в указанной выше форме.

Отсюда ясно, что вопрос термической устойчивости обмоток должен быть существенно пересмотрен. При этом необходимо учитывать, что для нагрева обмоток трансформатора существенное значение имеет не среднее значение, а среднеквадратичное значение тока. По литературным данным отношение среднеквадратичного значения тока к среднему значению тока для сталеплавильных

печей в период расплавления может колебаться в пределах от 1,15 до 1,25.

Кроме того, вопрос термической устойчивости следует привести в соответствие с современными взглядами на старение изоляции, т. е. на зависимость между температурой и длительностью воздействия температуры на изоляцию обмоток.

Режим нагрузки трансформаторов для руднотермических печей отличается более спокойным характером (рис. 4). Вопросы перегрузок возникают здесь чаще всего на почве стремления использовать все резервы мощности трансформатора печи. Таким образом в силу указанного характера работы печи вопросы перегрузок фактически сводятся к перемаркировке трансформаторов на повышенную мощность. Возможность такой перемаркировки определяется индивидуально в каждом конкретном случае в зависимости от типа трансформатора, степени его износа и способов, какими этот резерв мощности предположено использовать.

4. Третьей отличительной особенностью трансформаторов для электропечей является наличие регулировки вторичного напряжения. Для трансформаторов к сталеплавильным печам эта регулировка осуществляется обычно иначе, чем у трансформаторов к руднотермическим печам, а именно у трансформаторов для сталеплавильных печей первичная обмотка переключается с треугольника в звезду для понижения вторичного напряжения со 100 на 57,7%. Только для печей на 10 t и выше требуется еще одна промежуточная ступень вторичного напряжения порядка 75%.

При наличии у трансформатора нескольких ступеней вторичного напряжения всегда возникает вопрос о величине мощности на каждой ступени вторичного напряжения. Обычно этот вопрос решается в двух направлениях: либо мощность трансформатора задается постоянной на всех ступенях вторичного напряжения, либо вторичный ток задается постоянным на всех ступенях вторичного напряжения, т. е. мощность трансформатора уменьшается пропорционально понижению вторичного напряжения. Наличие нескольких ступеней вторичного напряжения вызывает, вообще говоря, увеличение типовой мощности трансформатора, зависящее от диапазона регулировки вторичного напряжения, т. е. от величины

$$P = \frac{U_{2\max} - U_{2\min}}{U_{2\min}} 100\%.$$

Теоретически в случае постоянной мощности всех ступеней вторичного напряжения увеличение типовой мощности составляет $P^0\%$. Если же вторичный ток остается постоянным во всем диапазоне регулировки, то увеличение типовой мощности трансформатора равно $1/2 P^0\%$. Практически увеличение выше теоретической величины, здесь играет роль еще целый ряд факторов. Увеличение типовой мощности не имеет места в случае переключения всей первичной обмотки с треугольника на звезду при условии постоянной величины вторичного тока и отсутствия промежуточных ступеней напряжения.

К трансформаторам для сталеплавильных печей предъявляется требование постоянной величины вторичного тока во всем диапазоне регулировки (трансформаторы «с падающей мощностью»).

Несколько иначе обстоит дело с трансформаторами для руднотермических процессов. При эксплуатации печей внесла целый ряд изменений в первоначальные технические данные. №

привести несколько примеров, когда эксплуатация печей ведется успешно на напряжениях, полученных искусственным путем и не предусмотренных проектами. Наиболее ярким примером является эксплуатация трансформаторов фирмы Сименс-Шукерт для печей типа Мигэ.

Во-первых, на некоторых из этих печей успешно осваиваются такие процессы, которые раньше не имелись в виду, например, плавка 75% ферросилиция.

Во-вторых, даже при выплавке 45% ферросилиция оказалось целесообразным так пересоединить концы вторичной обмотки, что на зажимах трансформатора стало возможным получить удвоенное вторичное напряжение. Правда, это пересоединение не используется полностью, но все же надо отметить тот факт, что печь работает на вторичное напряжение, значительно превышающее (на 35—40%) номинальные данные фирмы.

В-третьих, оказались почти совершенно излишними и широкий диапазон регулировки вторичного напряжения и большое число (56) вторичных ступеней напряжения. В работе используются около десяти ступеней напряжения и значительно меньший диапазон регулировки.

Другой пример показывает, что без изменения конструкции руднотермической печи вторичное напряжение трансформаторов при расширении одного завода было повышено сначала на 8% по сравнению с уже работавшими трансформаторами иностранной фирмы. Через пару лет путем искусственной комбинации пересоединения концов обмоток вторичное напряжение было повышено еще на 13%, хотя назначение печи не изменилось и не изменилась конструкция печи.

Необходимо отметить также, что у большинства установок не использовались дистанционные приводы для переключения ступеней напряжения, и эксплуатация весьма удачно велась при применении только ручного привода. Объясняется это тем, что необходимость переключения ступеней напряжения возникает крайне редко и только там, где имеются неблагоприятные условия с точки зрения лимитирования энергии. Нормально печь может работать несколько месяцев без изменения вторичного напряжения. Этот отказ от малоиспользуемых дистанционных приводов позволит сэкономить около 5000—6000 руб. на стоимости каждого трансформатора.

Наконец, у трансформаторов для руднотермических печей необходимо более рационально производить выбор мощностей на всем диапазоне регулировки вторичного напряжения. Практика эксплуатации большого числа установок показала, что работа печи происходит исключительно на высшей ступени напряжения. Низшие ступени нужны лишь эпизодически, в случаях, выходящих из рамки нормальной работы печи, когда не требуется полной мощности. Естественно, если отказаться от постоянной мощности на всем диапазоне регулировки вторичного напряжения, то можно достигнуть не только экономии в стоимости трансформаторов.

Кроме того, у всех мощных руднотермических печей наблюдается такое положение, что печь допускает повышение напряжения и мощности, трансформатор тоже имеет резерв мощности из-за уменьшения его с полной мощностью на всем диапазоне регулировки, а вместе с тем за редким исключением нельзя использовать полностью этот резерв мощности трансформатора, ибо этот резерв в основном вложен в низшие ступени вторичного

напряжения, на которых эксплуатация печи не ведется.

Таким образом вопрос о ступенях регулировки напряжения руднотермических печей заключается не только в экономии на стоимости трансформатора, а в правильном распределении резерва мощности на интенсификацию электротермического процесса.

5. Выше были охарактеризованы основные отличительные особенности наиболее распространенных трансформаторов для электропечей. Из этого обзора можно представить, насколько сильно эти трансформаторы отличаются от нормальных силовых трансформаторов. Для полноты перечисления, всех отличительных особенностей электропечных трансформаторов необходимо упомянуть еще очевидную для всех отличительную особенность, а именно большие значения тока на вторичной стороне трансформатора, доходящие до десятков тысяч ампер.

Выше уже указывалось на необходимость стандартизации ряда величин, определяющих технические данные электропечной установки. В данном случае прежде всего имеется в виду стандартизация шкалы токов и напряжений. В обоснование необходимости стандартизовать шкалу токов можно привести следующие соображения:

а) стандартизация шкалы токов даст возможность наиболее рационально использовать медь или алюминий для шин короткой сети и других деталей к ним;

б) стандартизация шкалы токов даст наиболее правильную токовую нагрузку электродов, ограничит шкалу размеров электродов и позволит стандартизовать электродержатели, гибкие кабели и другие детали;

в) стандартизация шкалы токов совместно с шкалой числа шин на фазу даст возможность стандартизовать детали выводов вторичного напряжения трансформаторов.

В настоящее же время проекты печных установок разрабатываются многими проектными организациями различных наркоматов. Стандартной шкалы токов не имеется, поэтому выбор величин вторичных токов происходит бессистемно, и имеются случаи, когда вторичные токи отличаются друг от друга на 10—15% у достаточно близких друг к другу типов печей. Таким образом в области больших токов должна быть установлена определенная система токов так же, как это имеет место в области высоких напряжений.

Вопрос стандартизации шкалы напряжений кажется на первый взгляд более сложным. Однако здесь позволительно будет напомнить о двух предыдущих примерах изменений напряжений работающих печей, а именно о переделке выводов вторичного напряжения у трансформаторов печей Мигэ и об увеличении напряжения на $8 + 13 = 21\%$ у других указанных ранее руднотермических печей. Это свидетельствует о большой гибкости конструкции руднотермической печи как аппарата для различных электротермических процессов.

Отсюда ясно, что выбор мелких ступеней вторичных напряжений, отличающихся друг от друга на 5—6, а на печах Мигэ даже на 1%, совершенно нецелесообразен. Необходимы ступени напряжения с более крупным шагом, например $p = 15\%$, и может быть еще выше.

С другой стороны, очевидно, что данная печь может быть использована для плавки другого ма-

териала, для которого рабочее напряжение U_2 для плавки первоначально заданного материала непригодно. Тогда можно считать, что для второго материала можно будет удовлетворить оптимуму экономических показателей при работе на одном из напряжений ряда с шагом p %, т. е. на одном из нижеследующих напряжений:

$$U_2 \left(1 + \frac{p}{100}\right); \quad U_2 \left(1 + \frac{p}{100}\right)^2;$$

$$U_2 \left(\frac{1}{1 + \frac{p}{100}}\right); \quad U_2 \left(\frac{1}{1 + \frac{p}{100}}\right)^2.$$

То, что такая стандартизация напряжений может дать хорошие результаты работы печи как при плавке одного и того же материала, так и при переходе на другой материал, свидетельствуют указанные выше примеры.

Наличие стандартных шкал токов и напряжений приводит в конечном итоге к стандартизации типов, т. е. конструктивных размеров печей и типов трансформаторов к ним. Однако изготовление пе-

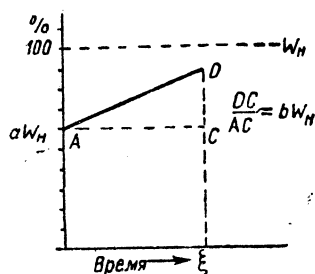


Рис. 6

чей и трансформаторов к ним допустимо не для любой пары значений токов и напряжений по этим шкалам. Наоборот, для каждого установившегося электротермического производства должны быть установлены две, максимум три типо-мощности печи как дублирующие производственные данные работающих заводов и один или два типа большей мощности как направление дальнейшего развития и интенсификации процесса. При этом очевидно, что для повышенных мощностей необходимо выбирать повышенное напряжение на дуге для улучшения экономических показателей работы печи.

Специальные вопросы проектирования электропечных трансформаторов. 1. В электротехнике существует ряд американских и европейских норм нагрева обмоток и масла. Но они до сего времени не были связаны с длительностью воздействия температуры на изоляцию, а потому не могли давать никаких данных для суждения о том, почему та или иная норма является пределом нагрева обмоток и масла. Кроме того, эксплуатация все время ставила новые вопросы, например, о допустимости перегрузок трансформатора при понижении температуры окружающей среды и т. п. На эти вопросы существующие нормы не могли дать правильного или однозначного ответа.

Эти вопросы получили вполне четкое освещение с того момента, когда Никкольсом и Монтзингером было установлено, что полное разрушение хлопчатобумажной изоляции в трансформаторном масле наступает в зависимости от температуры через различные промежутки времени, получившие название «срок службы изоляции». Этот закон выражается формулой:

$$c = Ae^{-\alpha \tau}, \quad (1)$$

где c — срок службы в годах; τ — температура изоляции; A и α — некоторые постоянные.

Этот закон проверен Никкольсом и Монтзингером для температур от 70 до 250°.

Весьма интересным и существенным для оценки условий работы трансформатора является тот факт, что срок службы изоляции при температуре 105° нормированной во всех европейских странах, оказался согласно данным этого закона равным около 1,35 года по Никкольсу и несколько выше по Монтзингеру, но во всяком случае значительно меньше срока амортизации электрической машины. То обстоятельство, что трансформаторы работают на практике значительно дольше, чем 1,35 года, и своего амортизационного срока в 15 лет и даже более, объясняется, во-первых, тем, что трансформаторы не все время работают с полной нагрузкой, а во-вторых, тем, что температура окружающей среды в течение года значительно колеблется. По этому получается, что обмотка трансформатора практически достигает 105° в течение ограниченного числа часов в году.

В общем виде ход расчета на основе этой теории заключается в том, что для каждой заданной температуры обмотки τ и длительности ее воздействия z по формуле (1) подсчитывается степень износа изоляции $\xi = \frac{z}{c}$. Результирующий износ изоляции равен сумме износов изоляции при каждой температуре данного графика нагрузки. Более интересно сравнение между собой процента износа изоляции для различных графиков нагрузки. В последнем случае оказывается, что возможные неточности в определении параметра A и α имеют существенного влияния на сравнение графика нагрузки.

Обычно для удобства расчетов график потерь представляется в виде ломаной линии. Тогда расчет τ — превышения температур масла для каждого отрезка ломаной линии потерь — может быть произведен по формуле:

$$\tau = a\tau_{\max} \left(1 - e^{-\frac{s}{z}}\right) + bz\tau_{\max} \left[\frac{s}{z} - (1 - e^{-\frac{s}{z}})\right] + \tau_0 e^{-\frac{s}{z}}.$$

Здесь a и b характеризуют прямолинейный график потерь (рис. 6), определяемый уравнением

$$W = W_n(a + bs),$$

где W_n — потери трансформатора при номинальной нагрузке; τ_{\max} — установившееся превышение температуры масла при номинальной нагрузке; τ_0 — начальное превышение температуры масла в момент времени $s = 0$; s — текущая координата времени, отсчет которой начинается каждый раз с момента нового излома линии графика потерь; z — постоянная времени нагрева масла.

Для сталеплавильных печей график нагрева (рис. 2), а следовательно, и график потерь, будет состоять только из горизонтальных и вертикальных линий, поэтому в формуле (2) коэффициент $b = 0$, она примет вид:

$$\tau = a\tau_{\max} \left(1 - e^{-\frac{s}{z}}\right) + \tau_0 e^{-\frac{s}{z}}.$$

В результате вычислений получается график превышения температур масла и меди обмотки окружающим воздухом в виде отрезков экспоненциальных кривых, которые мы опять-таки спря-

ем в виде ломаной линии для вычисления износа изоляции. Тогда для случая прямолинейного изменения температуры формула (1) примет вид:

$$c = Ae^{-at_2} \frac{\alpha \Delta t}{1 - e^{-\alpha \Delta t}}, \quad (5)$$

где t_2 — конечная высшая температура за данный промежуток времени с прямолинейным изменением температуры: $\alpha \Delta t$ — разность между начальной и конечной температурами за тот же промежуток времени. Коэффициенты A и α — те же, что и в формуле (1).

Практические расчеты велись не по формуле (5), определяющей срок службы c , а по формуле для ξ — износа изоляции, выраженного в процентах:

$$\xi = 0,773 \cdot 10^{-6} e^{\alpha t_2 s} \cdot \left(\frac{1 - e^{-\alpha \Delta t}}{\alpha \Delta t} \right), \quad (6)$$

где $\alpha = 0,088 t_2$ и t — те же величины, что и в формуле (5); s — время в часах.

В соответствии с этим были произведены расчеты целого ряда графиков нагрузки трансформатора для сталеплавильной печи. При этом было принято, что:

Продолжительность расплавления составляет 1 h
 рафинировки 3 h
 перерыва между плавками составляет 0,8 h

В течение же расплавления и рафинировки принимались различные значения среднеквадратичных токов, а именно: токи расплавления принимались равными от 100 до 140%, а токи рафинировки — от 100 до 60% от номинального значения.

Кроме того:

Отношение потерь в меди к потерям в железе равно 3
 Уменьшение потерь в железе при переключении первичной обмотки в треугольник происходит в . . . 3 раза
 Постоянная времени нагрева масла 3 h
 Превышение температуры масла над окружающим воздухом при номинальном режиме 40° C
 Превышение температуры меди обмотки над маслом при тех же условиях 20° C
 Установка трансформатора — внутренняя, причем температура окружающего воздуха изменяется . . . от 40 до +5° C

Изменение температуры окружающего воздуха в камере по месяцам было принято синусоидальным при постоянной температуре в течение месяца.

Некоторые из графиков изображены на рис. 7, а

b ; 8, a, b ; 9, a, b . При этом всюду принимали, что рафинировка ведется при соединении первичной обмотки в звезду, и тогда 100%-ное использование трансформатора будет при 100%-ной токовой нагрузке при расплавлении и 100%-ной токовой нагрузке при рафинировке, что сокращенно записывалось 100—100—0%. В этом случае годовой износ получился равным 5,53%, т. е. срок службы трансформатора равняется 18,1 года. Результаты расчетов для других нагрузок изображены на рис. 10.

На рис. 7, 8, 9 видно, что кривая температуры масла не следует точно за кривой нагрузки. Наоборот, в силу тепловой инерции масла последнее продолжает еще нагреваться некоторое время, хотя нагрузка резко изменилась. Далее видно, что хотя график нагрузки 115—95% и 130—83,3—0%, как показано на рис. 10, имеет один и тот же процент износа изоляции 6,03%, тем не менее кривые превышения температур масла и меди сильно отличаются друг от друга. При этом ни одна точка на этих кривых, принятая как характерная, не может служить для общей оценки износа изоляции, т. е. для оценки суровости термической нагрузки изоляции ни абсолютно, ни по сравнению с другим графиком.

Кривые же рис. 10 позволяют весьма наглядно сравнивать суровость термических нагрузок изоляции обмоток. Можно сразу, например, сказать, что если расплавление велось при среднеквадратичном значении тока 130% от номинального (что соответствует среднему значению тока $\frac{130}{1,18} = 100\%$ от номинального), то при токе рафинировки 80,8% от номинального будет тот же износ изоляции, что и при номинальной нагрузке. В этом случае общее использование мощности трансформатора составляет около 93%.

Можно также сразу сказать, что график 115—95—0% будет более жестким, чем график 135—70—0%; вообще кривые рис. 10 позволяют решать весьма быстро целый ряд практических задач с соблюдением одного лишь существенного условия: должно быть достаточно точно фиксировано, что для данной печи, способа регулировки электродов, конгломерата материалов, входящих в шихту, и т. п., отношение среднеквадратичного тока к среднему току составляет столько-то процентов, например 118%. В противном случае неизбежны пережог изоляции и авария трансформатора.

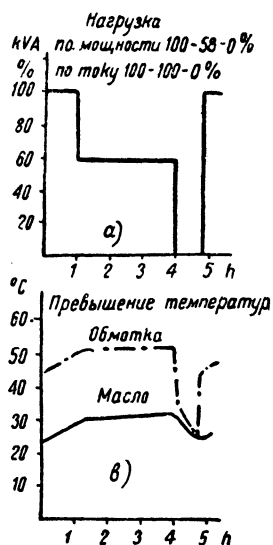


Рис. 7

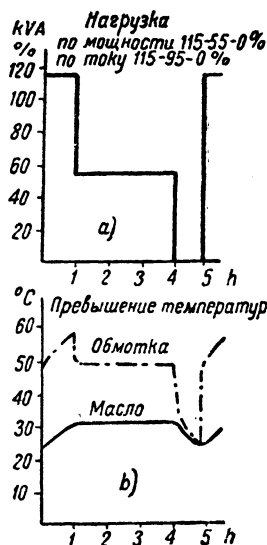


Рис. 8

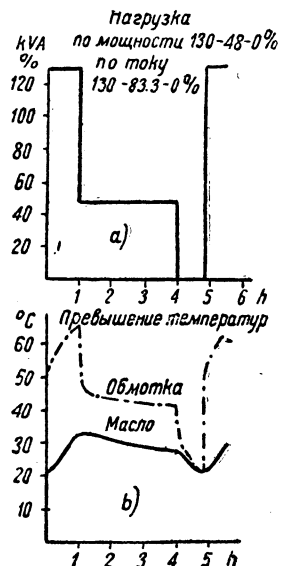


Рис. 9

Если в общих чертах установлены кривые для отношения среднеквадратичного тока к среднему, то целесообразно составить кривые, аналогичные кривым рис. 10 для других длительностей процессов расплавления и рафинировки. Вместе с тем ясно, что в этом случае все вопросы перегрузок получили бы технически более обоснованное решение.

В заключение нужно отметить, что для предельного обоснования существующих норм нагрева трансформатора необходимо достаточно точно на кривых рис. 10 очертить область применяемых режимов работ сталеплавильных печей, ибо если на практике окажется, например, что работа печей

Выемная часть трансформатора — увеличение веса на	
Бак	1
Прочие детали	1
Масло	1
Общее увеличение веса всего трансформатора . . .	1

Конечно, увеличение стоимости трансформатора, вызванное специальным выполнением его деталей, будет еще несколько выше. Таким образом, наличие существенное удорожание трансформатора и применение его должно быть детально обосновано.

Вопросы дальнейшего развития электропечных трансформаторов. 1. Применительно к трансформаторам для сталеплавильных печей развитие конструкций трансформаторов должно идти по следующим направлениям:

- а) разработка и внедрение стандарта вторичных токов и напряжений;
- б) использование результатов теории термического износа изоляции трансформаторов;
- в) разработка вопросов об отказе от дроссельной катушки и о повышении реактанса трансформатора

Разрешение этих задач во многом будет зависеть от производственной ситуации завода. Последнее обстоятельство тем более существенно, что трудоемкость проектных работ на переделку серии печных трансформаторов по тому или иному варианту весьма велика, а сам по себе выпуск электропечных трансформаторов составляет лишь несколько процентов от общего выпуска завода. Поэтому отсчитывая затраты времени и средств на перепроектирование серий печных трансформаторов менее эффективно для завода, чем соответствующие затраты на серии нормальных трансформаторов.

2. Для трансформаторов к руднотермическим печам, помимо тех вопросов, которые были указаны, возникает еще вопрос о дальнейшем развитии конструкции трансформаторов и всей печной установки, а именно вопрос об однофазных трансформаторах для печей большой мощности.

Здесь не имеется в виду внедрения однофазных трансформаторов по типу, примененному для печ Мигэ. Эти широко разрекламированные трансформаторы на практике оказались весьма неудачной конструкции. В этих трансформаторах имели место неоднократные пожары в железе, пробой изоляции и тому подобные аварии, показавшие необоснованность рекламы до проверки конструкции в эксплуатации.

Применение трех однофазных трансформаторов мыслится для трехфазных руднотермических печей как с круглой, так и прямоугольной ванной.

Практика конструирования силовых однофазных трансформаторов показала, что стоимость трехфазных трансформаторов превышает стоимость трехфазного трансформатора на 35—38%. Для печных трансформаторов превышение стоимости будет еще большим, так как вместо вывода на крышку трехфазного трансформатора начал обмоток трех фазных однофазных трансформаторов потребуется вывод начал и концов трех фаз.

Существенным недостатком трех однофазных трансформаторов является, очевидно, и увеличенный объем здания для трех камер. Таким образом можно прийти к заключению, что с точки зрения затрат на трансформаторы применение трех однофазных трансформаторов вместо одного трехфазного нецелесообразно.

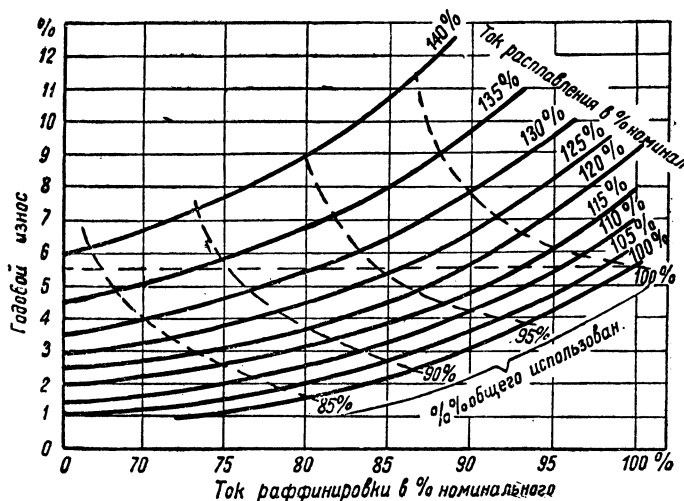


Рис. 10

происходит в основном где-то в области около точки 125—70—0%, то это будет свидетельствовать о недогрузке и плохом тепловом использовании трансформатора. Тогда нормы нагрева необходимо пересмотреть так, чтобы режим 125—70—0% давал оптимальное использование трансформатора.

2. Другим специальным вопросом проектирования электропечных трансформаторов является вопрос о раздельной регулировке напряжения фаз трансформаторов для руднотермических печей. Эта регулировка напряжения фаз трансформаторов должна служить одной из мер борьбы с явлением «дикий» и «мертвой» фаз руднотермической печи. Нормальные электропечные трансформаторы не допускают раздельной регулировки фаз, так как при этом появляются чрезвычайно большие добавочные потери в трансформаторе и существует опасность возникновения сильных местных перегревов отдельных деталей трансформатора.

Поэтому для целей раздельной регулировки напряжения фаз необходимы трансформаторы специальной конструкции. Сейчас о конкретном эффекте раздельной регулировки говорить еще преждевременно.

Тем не менее этот вопрос является чрезвычайно существенным, так как опыт проектирования специальных конструкций показал, что эти трансформаторы получаются тяжелее и дороже, чем нормальные.

Некоторое представление об этом дает нижеследующая таблица, показывающая среднее увеличение веса специальной конструкции трансформатора по сравнению с нормальной.

Выше были сформулированы те требования, которые предъявляются к конструкции трансформаторов для электропечей, и были сделаны необходимые выводы из них в виде проблем, подлежащих решению в ближайшее время. Здесь надо еще раз подчеркнуть, что усилия од-

них электриков без металлургов и металлургов без электриков для решения этих проблем будут недостаточны.

Для разрешения задач развития советской электротермии необходимо объединить творческие усилия и электриков, и металлургов.

Изучение режима работы индукционных бессердечниковых печей

А. В. ДОНСКОЙ

Ленинградский индустриальный институт

До настоящего времени наши заводы, выпускающие индукционные бессердечниковые печи, производят их электрический расчет на момент расплавленной садки, принимая при этом постоянное значение удельного сопротивления материала загрузки ρ , соответствующее температуре в пределах $800-1800^\circ$, и магнитную проницаемость материала, равную единице ($\mu=1$).

Однако работающие установки индукционных печей в силу их широкой универсальности используются при самых разнообразных условиях, существенно отличающихся от принимаемых в расчетах. Так, загрузка печи обычно производится раздробленной шихтой и порой весьма неопределенной конфигурации. Иногда по технологическим соображениям производят плавку при неполном заполнении тигля. Весьма часто в установках индукционных печей, предназначенных для плавки черных металлов, плавят цветные металлы или во всяком случае металлы с сильно отличающимися физическими данными.

К тому же большинство металлов за весь период плавки в зависимости от температуры изменяет свое удельное сопротивление в 10—15 раз, что обязывает при изучении режима работы индукционной печи при плавке любого металла учитывать зависимость удельного сопротивления от температуры $\rho=f(t)$.

Не останавливаясь в данной статье на вопросе об определении эффективного значения магнитной проницаемости при работе индукционных печей, так как он требует особого рассмотрения (во тем не менее, имея в виду зависимость магнитной проницаемости от напряженности поля $\mu=f(H)$, явление магнитного скин-эффекта и влияние формы тела), можем констатировать, что на основании зависимости магнитной проницаемости от температуры $\mu=f(t)$ ее максимальное значение определяется для промышленных печей в нескольких десятках (10—30).

Все это даже на основании общеизвестных простейших аналитических формул обуславливает грубое непостоянство режима работы промышленных установок индукционных печей с питанием любого типа преобразователей частоты. Поэтому требование, обычно предъявляемое в заводской практике к точности метода расчета — 3%, по меньшей мере следует считать неоправданным, так как вычисленный режим будет соответствовать наблюдаемому с некоторым приближением только в момент расплавленной садки. В качестве объекта изучения автором была взята

однотонная индукционная печь типа ПО-600, работающая по схеме параллельного резонанса (рис. 1).

Приведем номинальные данные генератора и основные расчетные данные печи.

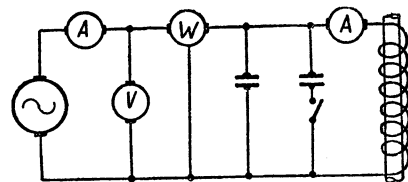
Мощность генератора $P_z=650$ kVA, напряжение $U_z=2000$ V, сила тока $I_z=325$ A, частота $f=500$ Hz.

Диаметр садки $d_m=500$ mm; высота $h_m=735$ mm.

Диаметр индуктора $d_1=690$ mm, высота $h_1=810$ mm.

Расчетные физические коэффициенты загрузки: $\rho=110 \cdot 10^{-3} \Omega \text{ cm}^2/\text{cm}$ $\mu=1$. Активное сопротив-

Рис. 1. Принципиальная схема включения индукционной печи типа ПО-600



ление: печи $R_n=0,081 \Omega$; индуктора $R_1=0,0179 \Omega$; металла, вносимого в индуктор, $R_m=0,0628 \Omega$. Реактивное сопротивление печи $X_n=0,72 \Omega$; коэффициент самоиндукции $L=0,229$ mH; емкость подключенных конденсаторов $C=421 \mu\text{F}$.

Ввиду того что изучение режима работы печи может представить интерес только за длительный период эксплуатации, а также во избежание возможных случайных выводов все графики зависимостей $R_n=f(t)$; $L_n=f(t)$; $R_{sk}=f(t)$ и т. д. иллюстрируются тремя кривыми, где кривая 1 дает среднее из 12 плавов значение, а кривые 2 и 3 дают наиболее характерные предельные значения отклонения от средневзвешенной кривой.

Измеренные значения электрических параметров индукционной печи за период плавки не претендуют на точность более 3—4%.

На рис. 2 графически представлено изменение активного сопротивления индукционной печи R_n типа ПО-600 за период плавки в зависимости от времени включения генератора t . На основании этой зависимости, а также и последующих, можно сделать заключение о трех характерных периодах работы индукционной печи со следующими интервалами времени: 1) от момента включения генератора до 8—10 min (отрезок ab); 2) от 10 до 40 min (отрезок bc) и 3) от 40 min до конца плавки (отр. cd).

Первый момент включения генератора на индукционную печь характеризуется для всех пла-

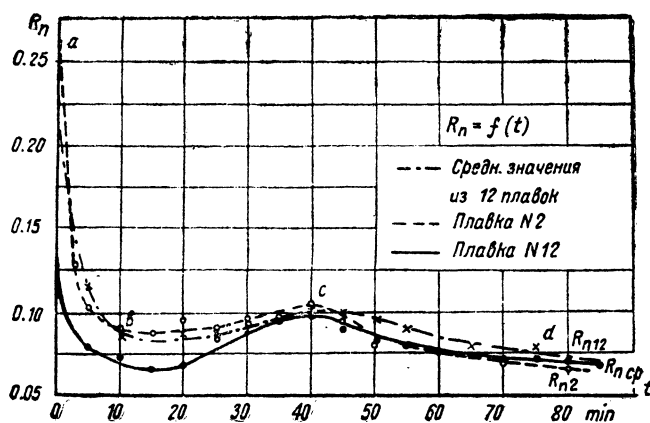


Рис. 2. Зависимость активного сопротивления индукционной печи R_n от времени включения генератора t

вок максимальным значением активного сопротивления, превосходящим расчетное его значение, соответствующее расплавленному состоянию металла, на 300—400%. Это, как показывают эксперименты и расчет, может быть объяснено максимальным значением в этот момент магнитной проницаемости материала загрузки и отсутствием контакта между отдельными ее элементами. Затем по мере нагревания, несмотря на рост с температурой удельного сопротивления и почти постоянным значением магнитной проницаемости, активное сопротивление печи за первые 10 min работы падает почти до своего минимального значения. С интервала времени от 8—10 min после резкого падения активного сопротивления за счет образования контактов между элементами загрузки обнаруживается тенденция незначительного увеличения R_n , так как в этот момент еще продолжается дополнительная загрузка холодной шихты. В момент времени около 40 min до начала включения, соответствующего быстрому началу падения магнитной проницаемости (средняя температура металла загрузки около 800°), активное сопротивление сначала падает быстро, а затем медленнее. Быстрое падение активного сопротивления печи происходит вследствие потери ферромагнитных свойств шихты. Дальнейшее медленное падение активного сопротивления будет происходить по мере расплавления нижних слоев, устранения контактных сопротивлений и образования сплошного блока расплавленного металла.

На рис. 3 дана зависимость коэффициента самоиндукции индукционной печи $L_n = f(t)$ от времени включения генератора; в этом случае весь режим работы печи может быть подразделен также на три основных периода. В момент включения ин-

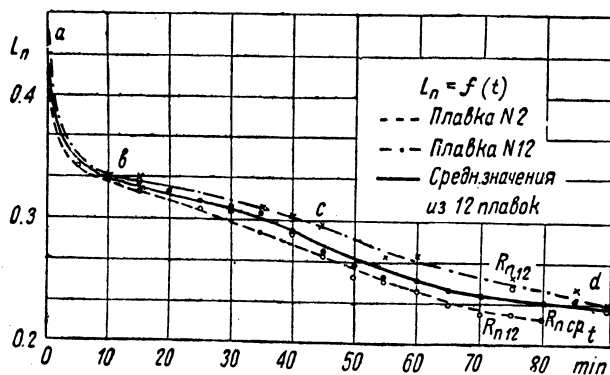


Рис. 3. Зависимость коэффициента самоиндукции L_n от времени включения генератора t

дукционная печь имеет максимальное значение коэффициента самоиндукции, превосходящее расчетное до 200%.

Все плавильные индукционные печи работают с компенсацией их реактивной мощности до полного резонанса. При всех схемах образования при этом колебательного контура наиболее существенной расчетной величиной является эквивалентное активное сопротивление $R_{эк}$, окончательное выражение которого через электрические параметры для случая параллельного резонанса имеет вид:

$$R_{эк} = \frac{R_n R_c + m}{R_n + R_c},$$

где R_n — активное сопротивление печи; R_c — активное сопротивление конденсаторной батареи; m — волновое сопротивление колебательного контура.

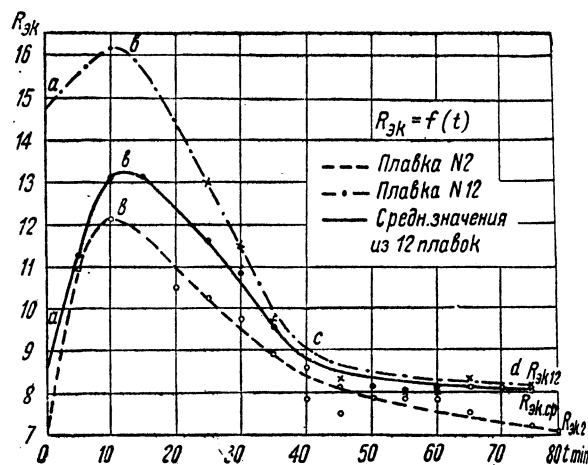


Рис. 4. Зависимость эквивалентного активного сопротивления контура печи $R_{эк}$ от времени включения генератора

Так как потери мощности в конденсаторной батарее составляют 3—5% от мощности, потребляемой в печи, то мы можем принять $R_c =$ тогда

$$R_{эк} \approx \frac{m}{R_n} = \frac{L_n}{c R_n},$$

где L_n — коэффициент самоиндукции печи; c — емкость конденсаторной батареи.

Рассмотрение графика зависимости эквивалентного активного сопротивления контура от времени включения генератора (рис. 4) с еще большей наглядностью показывает, что режим работы индукционной печи за плавку можно также разделить на три основных периода.

Первый период (отрезок $a-b$) характеризуется быстрым уменьшением значения активного сопротивления и коэффициента самоиндукции печи, что для сохранения условия резонанса обязывает увеличивать емкость конденсаторной батареи и сопровождается быстрым ростом эквивалентного активного сопротивления.

Во втором периоде (отр. $b-c$) за счет некоторого увеличения активного сопротивления печи и замедленного уменьшения коэффициента самоиндукции происходит сравнительно быстрое падение значения эквивалентного активного сопротивления.

Третий период (отр. $c-d$), обычно составляющий около 50% от всего времени плавки, е-

период спокойной работы печи и некоторого постоянства режима.

Мощность, подводимая от генератора к печному контуру, при настройке последнего в резонанс с частотой питающего тока зависит исключительно от эквивалентного активного сопротивления нагрузки, и потому графики зависимости $P_r = f(t)$ (рис. 5) не требуют особого рассмотрения, хотя на рисунке также отчетливо могут быть выявлены три характерных периода.

Но так как все печи типа ПО-600 оказались рассчитанными на минимальное значение эквивалентного активного сопротивления, соответствующее

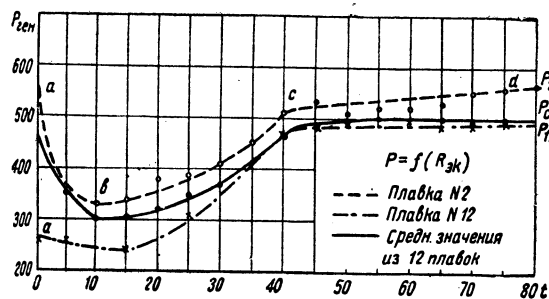


рис. 5. Зависимость мощности индукционной печи от времени включения генератора $P = f(t)$ или от эквивалентного сопротивления контура печи $P = f(R_{эк})$

щее моменту расплавленной стали, то, следовательно, при больших значениях эквивалентного активного сопротивления мощность, подводимая к генератора, ограничивается его номинальным напряжением и подсчитывается по формуле

$$P_2 = \frac{U_2^2}{R_{эк}}$$

Таким образом увеличение эквивалентного сопротивления влечет за собой уменьшение подводимой к печи мощности.

Как видно из графиков рис. 6, электрический п. д. индукционной печи есть величина также постоянная и за весь период плавки меняется в пределах 15—20%.

Протекание этих кривых также позволяет усмотреть некоторую закономерность в изменении, отмеченную нами при рассмотрении прочих графиков.

Изменение коэффициента мощности $\cos \varphi$ (рис. 7) индукционной печи за период плавки происходит в зависимости от изменения коэффициента самоиндукции печи L_n и ее активного сопротивления R_n также подчиняется закономерностям, которые мы положены в объяснение зависимостей $R_n = f(t)$; $L_n = f(t)$ и т. д.

Все характерные интервалы времени с несколько меньшей очевидностью, соответствующие им периодам плавки, могут также быть замечены и на этих кривых.

Приведенные графики с полной очевидностью ожидают нас в весьма широком отклонении в электрических параметрах печи за период плавки рассчитанных на момент расплавленной садки.

Расхождение в величине коэффициента самоиндукции печи L_n , измеренного в начале плавки, с расчетным его значением или с измеренным в плавки, достигает 140—220%.

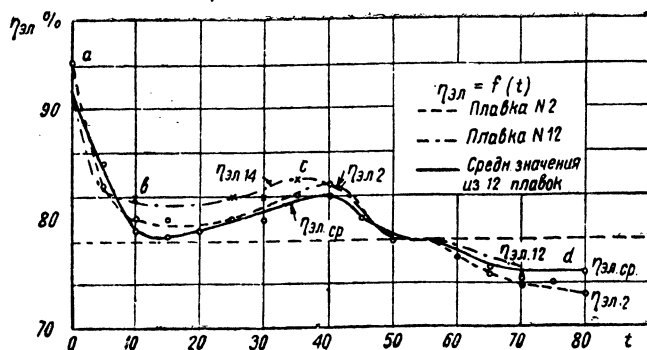


Рис. 6. Зависимость электрического к. п. д. ($\eta_{эл}$) индукционной печи типа ПО-600 от времени включения генератора

Это обстоятельство до настоящего времени не находит отражения в технических расчетах, тем не менее практически учитывается тем, что 50% емкости конденсаторной батареи всегда делаются секционированными для подстройки контура в резонанс с частотой питающего генератора.

Расхождение активного сопротивления печи R_n , измеренного в начале плавки и в конце или, что почти то же самое, по сравнению с расчетным его значением, достигает 300—500%.

Мощность P_2 , подводимая к печи, являясь функцией эквивалентного активного сопротивления контура, имеет за весь период плавки аналогичное расхождение с последним, но противоположное по знаку.

Поэтому правильнее было бы считать критерием точности расчета наибольшее значение использования генератора за весь период плавки, которым в основном и будут характеризоваться тех-

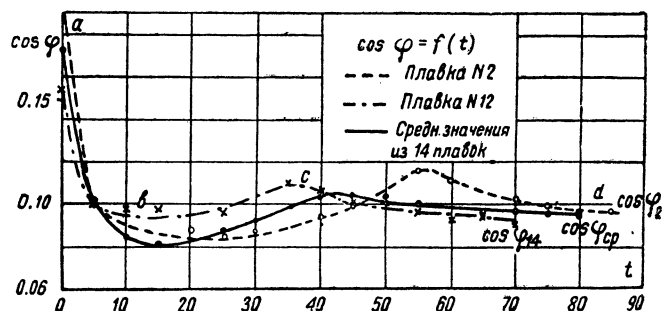


Рис. 7. Зависимость коэффициента мощности ($\cos \varphi$) индукционной печи типа ПО-600 от времени включения генератора t

нико-экономические показатели работы установки, как-то: расход энергии kWh/t, производительность t/h, время плавки t и пр.

Таким образом изучение вопроса об изменении электрических параметров индукционной печи за период плавки, кроме бесспорного теоретического интереса, имеет и большое практическое приложение.

Экспериментальные данные настоящей статьи являются предварительной частью исследовательской работы, законченной автором в лаборатории электрических печей Ленинградского промышленного института.

Нагрев вихревыми токами металлических частей опорной конструкции индукционной печи

И. А. ТОРОПОВ

Ленинградский завод „Электрик“

За истекшие последние десять лет промышленные индукционные печи высокой частоты зарекомендовали себя как вполне надежный и рентабельный металлургический агрегат. К настоящему моменту в эксплуатации находятся установки мощностью 1200—1650 kW и емкостью в 4—8 т стали.

В литературе [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9] достаточно освещены вопросы теории и расчета индукционных печей высокой частоты. Нужно полагать, что на данном этапе развития промышленных индукционных печей вполне своевременно поставить задачу о рациональной опорной конструкции печей с точки зрения нагрева ее токами Фуко.

Задачу о потерях на токи Фуко в однородном магнитном поле впервые рассмотрел Thomson [11], а случай цилиндра — Heaviside [12]. Потерями от вихревых токов в массивных железных телах применительно к конструкции трансформаторов (продольные болты, крайние листы сердечника трансформатора и т. п.) занимался Э. Розенберг [10]; потери в кожухе однофазных и трехфазных трансформаторов исследовал Е. Г. Марквардт [16]. Общее состояние проблемы таково, что возможно ее разрешить и в рассматриваемом частном случае индукционной печи.

Известно, что рассматриваемый тип печи благодаря своеобразному принципу действия имеет низкий $\cos \varphi$, колеблющийся от 0,07 до 0,1, и, как следствие этого, сравнительно при небольших активных мощностях печи она имеет большие реактивные мощности.

Сосредоточение больших реактивных мощностей в небольшом пространстве, занимаемом печью, к тому же при повышенных частотах 500 Hz и более, естественно, вызывает у проектировщиков этого типа печей большие опасения о чрезмерном нагреве вихревыми токами деталей опорной конструкции.

Заводы и фирмы, строящие эти печи, различно решают вопрос об опорной конструкции печи. В СССР завод „Электрик“ строит индукционные печи с опорной конструкцией, выполняемой в форме прямоугольного параллелепипеда из маломагнитной стали, отдельные стержни в такой конструкции между собой изолируются и не образуют замкнутых электрических контуров. Фирма Сименс-Гальске применяет в опорных конструкциях нелегированное обычное железо, но придает деталям такие сечения и размеры, при которых потери в конструкции от вихревых токов незначительны. В Швеции фирма ASEA использует для защиты каркасов печей от токов Фуко магнитные экраны из трансформаторного железа, фирма Метрополитен-Виккерс также прибегает к подобной защите. AEG применяет медную экранировку.

Из всех конструкций наиболее простой следует считать опорную конструкцию, выполняемую из обыкновенных торговых сортов железа, но при этом необходимо иметь возможность определить ее минимальные габаритные размеры, при которых будет иметь место незначительный перегрев (40—50°)

металлических деталей конструкции над температурой окружающей среды и потеря мощности не более 1—2% мощности генератора.

В работающих неэкранированных промышленных индукционных печах обычно опорная конструкция выполняется из прокатных профилей металла: уголков, швеллеров, круглого, листового и полочного материала. Отдельные стержни в таких конструкциях, как правило, изолируются друг от друга и не образуют замкнутых электрических контуров.

Наблюдения за индукционными печами, находящимися в эксплуатации, показывают, что стержни конструкции, расположенные вертикально, параллельно оси индуктора, нагреваются сильнее, а стержни боковые.

Стержни нижнего пояса рамы, находящиеся под индуктором, имеют степень нагрева, зависящую исключительно от расстояния до индуктора и не могут быть сравниваемы с другими стержнями.

Решение поставленного вопроса сводится к тому, чтобы определить степень нагрева вихревыми токами отдельных массивных железных стержней, расположенных во внешнем магнитном поле индукционной печи. Сложность решения такой задачи очевидна, поэтому приходится прибегнуть к ряду допущений, основные из которых следующие: пренебрегаем взаимовлиянием стержней ввиду их взаимной удаленности; профили материала — уголки и швеллера — считаем сплошными и рассматриваем как полосы прямоугольного сечения; потери будут учитываться только от компоненты поля, совпадающей с осью стержня (пренебрегаем компонентой поля, перпендикулярной поверхности стержня); пренебрегаем влиянием отдельных стержней опорной конструкции на расчетные параметры печи; потери на гистерезис не учитываются.

Мощность вихревых токов и температура греемых мест стержня. По теореме Пойнтинга мощность вихревых токов

$$P_f = [EH].$$

Для определения векторов электрического и магнитного поля воспользуемся уравнениями Максвелла:

$$\operatorname{rot} E = -B;$$

$$\operatorname{rot} H = I;$$

и законом Ома в векторной форме

$$\chi E = I.$$

Рассмотрим случай нагрева вихревыми токами стержня, помещенного во внешнее магнитное поле индукционной печи. Выделим на стержне элемент поверхности, на котором можно считать напряженность магнитного поля — величиной постоянной. В этом случае из уравнений (2), (3) легко получаются следующие значения изменения напряженности как магнитного, так и электрического поля.

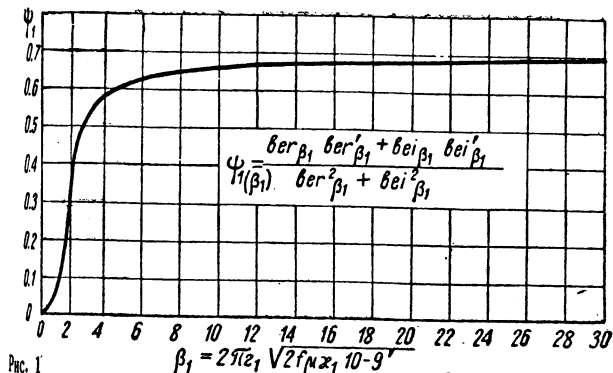


Рис. 1

Для цилиндра

$$H_z = H_0 \frac{J_0(k_1 r)}{J_0(k_1 r_1)}; \quad (5)$$

$$E_\varphi = -H_0 \frac{k_1}{x_1} \frac{J_1(k_1 r)}{J_0(k_1 r_1)}; \quad (6)$$

для пластины

$$H_z = H_0 \frac{\text{ch } k_2 x}{\text{ch } \frac{1}{2} k_2 a}; \quad (7)$$

$$E_y = -H_0 \frac{k_2}{x_2} \frac{\text{sh } k_2 x}{\text{ch } \frac{1}{2} k_2 a}. \quad (8)$$

Из последних уравнений соответственно получим вещественную составляющую векторов на поверхности стержней:

$$H_z = H_0; \quad (9)$$

$$E_{\varphi \text{ Real}} = \frac{H_0 \beta_1}{x_1 r_1} \frac{\text{ber } \beta_1 \text{ber}' \beta_1 + \text{bei } \beta_1 \text{bei}' \beta_1}{\text{ber}^2 \beta_1 + \text{bei}^2 \beta_1}; \quad (10)$$

$$E_{y \text{ Real}} = \frac{H_0 \beta_2}{x_2 a} \frac{\text{sh } 2\beta_2 - \sin 2\beta_2}{\text{ch } 2\beta_2 + \cos 2\beta_2}. \quad (11)$$

Применив теорему Пойнтинга, уравнение (1), и приняв векторы напряженностей магнитных полей индуктора и металла повернутыми в данном случае один по отношению к другому на 180° , получим: для цилиндра

$$P_y = 2\pi \sqrt{2} \psi_1(\beta_1) F \sqrt{f\mu\rho_1} 10^{-9} \frac{1}{m} \sum_{n=1}^{n=m} (H_a - H_b)_m^2 [\text{W}]; \quad (12)$$

для пластины

$$P_y = 2\pi \psi_2(\beta_2) F \sqrt{f\mu\rho_2} 10^{-9} \frac{1}{m} \sum_{n=1}^{n=m} (H_a - H_b)_m^2 [\text{W}]. \quad (13)$$

Уравнения (12) и (13) справедливы, когда загрузка представляет собой сплошной цилиндрический блок, для случая же действительных условий работы печи загрузка состоит из отдельных кусков. При этом направление вихревых токов имеет хаотический характер, и тогда значение напряженности магнитного поля H_b должно быть принято значительно меньше, чем это получено для случая сплошного блока. Хорошее совпадение результатов расчета с наблюдениями получается, если положить

$$2\pi \sqrt{2} \psi_1(\beta_1) F \sqrt{f\mu\rho_1} 10^{-9} \frac{1}{m} \left(\sum_{n=1}^{n=m} H_{am}^2 - \sum_{n=1}^{n=m} H_{bm}^2 \right) [\text{W}]; \quad (14)$$

$$2\pi \psi_2(\beta_2) F \sqrt{f\mu\rho_2} 10^{-9} \frac{1}{m} \left(\sum_{n=1}^{n=m} H_{am}^2 - \sum_{n=1}^{n=m} H_{bm}^2 \right) [\text{W}]. \quad (15)$$

где: H_{am}^2 — действующее значение квадрата напряженности магнитного поля индуктора в А/см; H_{bm}^2 — то же металла загрузки; F — боковая по-

верхность в см²; ρ — сопротивление металла в Ω см; f — частота тока в Гц; μ — магнитная проницаемость тела.

$$\psi_1(\beta_1) = \frac{\text{ber } \beta_1 \text{ber}' \beta_1 + \text{bei } \beta_1 \text{bei}' \beta_1}{\text{ber}^2 \beta_1 + \text{bei}^2 \beta_1}; \quad (16)$$

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= 2\pi r_1 \sqrt{2f\mu x_1} 10^{-9}; \\ \psi_2(\beta_2) &= \frac{\text{sh } 2\beta_2 - \sin 2\beta_2}{\text{ch } 2\beta_2 + \cos 2\beta_2}; \\ \beta_2 &= \pi d \sqrt{f\mu x_2} 10^{-9}. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Температура нагрева вихревыми токами для случая установившегося теплового равновесия может быть также легко вычислена из вышеполученных формул: для цилиндра

$$\vartheta_1 = \vartheta_2 + \frac{2\pi \sqrt{2} H_0^2 \psi_1(\beta_1)}{\alpha} \sqrt{f\mu\rho_1} 10^{-9} ^\circ\text{C}; \quad (18)$$

пластины

$$\vartheta_1 = \vartheta_2 + \frac{2\pi H_0^2 \psi_2(\beta_2)}{\alpha} \sqrt{f\mu\rho_2} 10^{-9} ^\circ\text{C}, \quad (19)$$

где ϑ_2 — температура окружающей среды в $^\circ\text{C}$; α — коэффициент теплоотдачи на конвекцию и лучеиспускание в $\frac{\text{W}}{\text{cm}^2 ^\circ\text{C}}$.

Напряженность внешнего магнитного поля индукционной печи. Внешнее, возбуждающее вихревые токи в опорной конструкции печи магнитное поле будет складываться из двух магнитных полей — магнитного поля индуктора и металла загрузки. Укажем, что ток металла (в расплавленном его состоянии) в силу скин-эффекта будет течь по поверхности загрузки и ее можно рассматривать как короткозамкнутый виток.

Таким образом задача определения напряженности магнитного поля индукционной печи сводится к определению напряженности магнитного поля двух индукционных катушек, одна из них — металл загрузки, другая — индуктор.

Для вычисления напряженности магнитного поля однослойной цилиндрической катушки К. Фэльд [13] дает следующие формулы: для случая $I(\rho \ll R)$

$$H_z = \frac{NI}{2\pi l} [A_2(n, \gamma_2) \pm A_1(n, \gamma_1)] [\text{A/cm}]; \quad (20)$$

для случая $II(\rho \geq R)$

$$\bar{H}_z = \frac{NI}{2\pi l} [B_2(n, \gamma_2) \pm B_1(n, \gamma_1)] [\text{A/cm}] \quad (21)$$

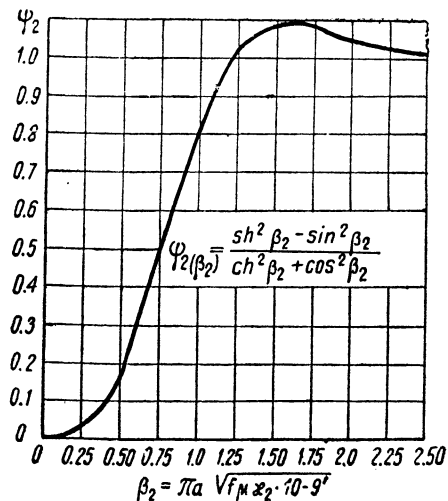


Рис. 2

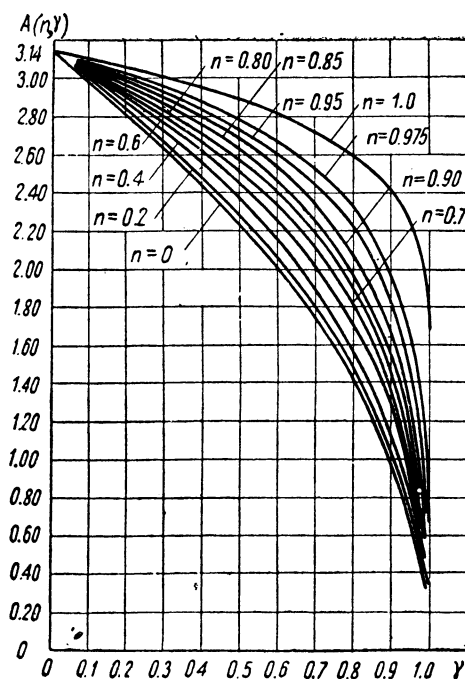


Рис. 3

В уравнениях (20) и (21) верхний знак относится к случаю, когда исследуемая точка находится между торцевыми плоскостями катушки, в других случаях нужно принимать знак минус.

Радиальная составляющая

$$H_r = \frac{NI}{2\pi l} \sqrt{\frac{R}{\rho}} [C_1(n, \gamma_1) - C_2(n, \gamma_2)] \text{ [A/cm]}. \quad (22)$$

Здесь:

$$\begin{aligned} A(n, \gamma) &= \frac{\pi}{2} + F' \sqrt{1-\gamma} (1 + \sqrt{1-n}) + \\ &\quad + F(\varphi, b^2) [F' - E'] - F'E(\varphi, b^2); \\ B(n, \gamma) &= 2F' \sqrt{1-\gamma} - A(n, \gamma); \\ C(n, \gamma) &= \frac{2}{k} [F' - E'] - kF'; \\ k^2 &= n\gamma; \end{aligned}$$

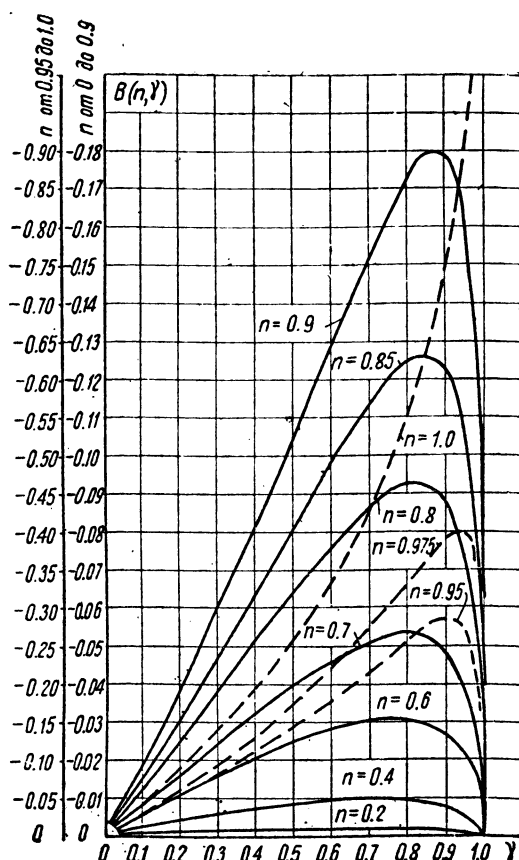


Рис. 4

F' и E' — полные эллиптические интегралы первого и второго рода; $F(\varphi, b^2)$ и $E(\varphi, b^2)$ — эллиптические интегралы первого и второго рода;

$$\begin{aligned} \sin \varphi &= \frac{1-n}{1-k^2}; \quad b^2 = 1-k^2; \quad n = \frac{4R\rho}{(R+\rho)^2}; \\ \gamma_1 &= \frac{(R+\rho)^2}{(R+\rho)^2 + z_1^2}; \quad \gamma_2 = \frac{(R+\rho)^2}{(R+\rho)^2 + z_2^2}; \end{aligned}$$

R — радиус катушки в см; ρ — расстояние от оси катушки до исследуемой точки в см; z_1 и z_2 — расстояния от концов катушки до рассматриваемой точки в см; N — число витков катушки; l — высота катушки в см.

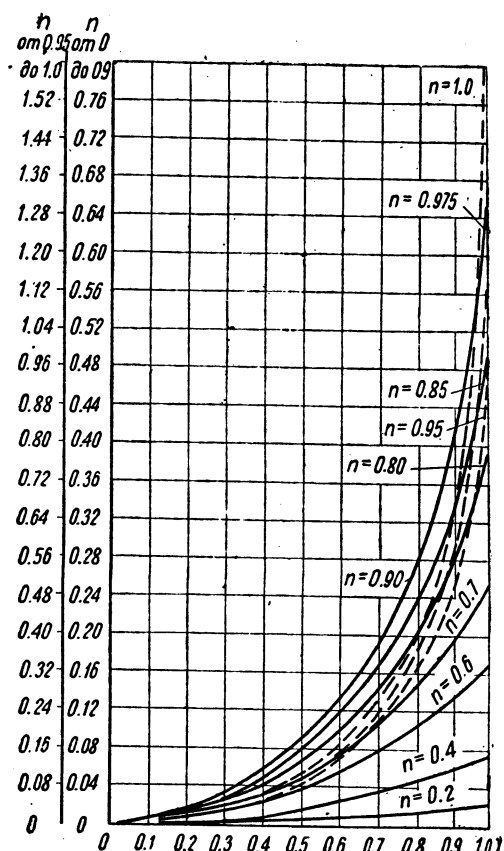


Рис. 5

Для некоторых аргументов n и γ автор вычислил значения функций $A(n, \gamma)$; $B(n, \gamma)$ и $C(n, \gamma)$ и сверил их по таблицам Фэльша (рис. 3, 4 и 5). С целью получения максимальной точности нахождения функций $A(n, \gamma)$; $B(n, \gamma)$ и $C(n, \gamma)$ надлежит принимать такие значения радиуса R , чтобы всегда значение n приходилось на построенной кривой, это будет при

$$\rho_{1,2} = R \left(\frac{2-n \pm \sqrt{(2-n)^2 - n^2}}{n} \right).$$

В целях экспериментальной проверки формул (20), (21) и (22) для вычисления напряженности магнитного поля катушки была использована однослойная цилиндрическая катушка, имеющая высоту 386 мм, диаметр 140 мм и число витков 21,75. Поле в катушке 160 А частоты 50 Гц создавалось по индуктируемой э. д. с. в измерительной катушке.

Результаты измерений показали, что формулы (20), (21) и (22) дают ошибку (положительную или отрицательную) не более чем 5%, и лишь в отдельных случаях она достигает 10–11%.

Для проверки формул (14) и (15) для опреде-

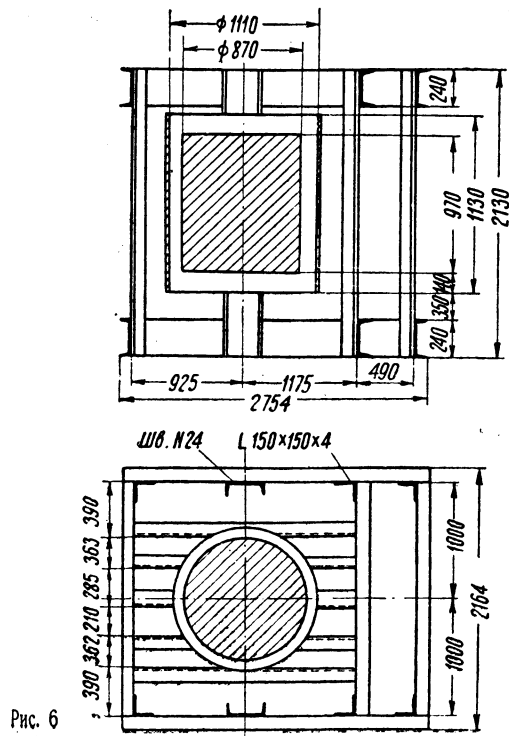


Рис. 6

мощности вихревых токов была изготовлена двух-слойная индукционная катушка с средним диаметром 160 мм, высотой 213 мм и числом витков 146.

При положении испытуемого железного образца в полости индукционной катушки потери в нем определялись по разности потерь, измеренных ваттметрами при наличии внутри катушки детали и удалении ее. Когда образец находился во внешнем поле катушки (следовательно, при сравнительно малых потерях в нем), измерение потерь производилось калориметрически. Потери в подобных случаях определялись также расчетно—по перегреву на поверхности образца.

Результаты трех измерений даны в таблице:

Наименование	Частота, Hz	Поглощаемая мощность W		Отклонения, %	Метод измерения
		расчитанная по форм. (16) и (17)	эксперимент. определенная		
нагрев железного швеллера длиной 150 мм, помещенного в катушку, при токе 10 А	1000	224	229	2,2	Ваттметр
нагрев железного цилиндра диаметром 130 мм, длиной 130 мм магнитном поле печи типа ПО-90 . . .	500	12,5	14,15	13	Калориметр
нагрев железного уголка 60x50x6 длиной 130 мм в магнитном поле той же печи . .	500	82	90,1	10	Тепловой баланс

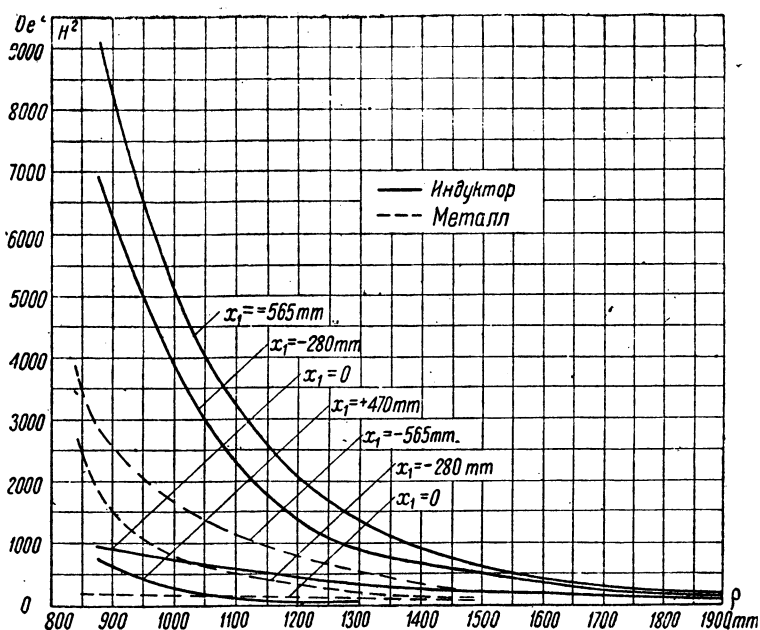


Рис. 7

не была построена из-за отсутствия нужных профилей легированной стали. В 1935—1936 гг. печь была реализована заводом с опорной конструкцией из обыкновенных торговых сортов железа с экранированием магнитного потока пакетами из трансформаторного железа. Во время первых же слаточных плавов оказалось, что магнитные экраны сгущают магнитный поток в зонах расположения крепежных деталей и нагревают их до недопустимо высокой температуры. Пришлось прибегнуть к экранированию некоторых деталей опорной конструкции медью. Схематический разрез индукционной печи представлен на рис. 6.

Основные расчетные параметры печи: число витков индуктора 15,8; напряжение на печи 1900 В; ток ее 6100 А; активное сопротивление индуктора 0,00557 Ω; металла (приведенное) 0,0247 Ω; полное активное сопротивление печи 0,03027; реактивное 0,31, кажущееся 0,311 Ω. Согласно расчету вторичный ток печи равен $8,36 \cdot 10^{-4}$ А.

Изменение квадрата напряженности магнитного поля индуктора и металлозагрузки в зоне расположения опорной конструкции вдоль оси в зависимости от расстояния от оси индуктора r , вычисленное по формуле (21), представлено кривыми рис. 7.

Приводим расчет нагрева вертикального швеллера каркаса.

Пользуясь рис. 7, мы построили кривые изменения квадрата напряженности магнитного поля индуктора и металла вдоль швеллера. По этим кривым было найдено, что для $m = 10$

$$\frac{1}{m} \left(\sum_{n=1}^{n=m} H_{am}^2 - \sum_{n=1}^{n=m} H_{bm}^2 \right) = 1851 \text{ Ое}^2,$$

и

$$H = 43,1 \text{ Ое}.$$

Этой напряженности соответствует $\mu_1 = f(H) = 360$.

В рассматриваемом случае соотношение $\frac{b}{a} = \frac{404}{10,5} = 38,4:1$; $s = 42,73 \text{ см}^2$; $\frac{l}{\sqrt{s}} = 32,6$. По отно-

В 1933 г. техническим отделом завода „Электросталь“ была разработана конструкция 4-т индукционной печи мощностью 1200 кВт, частоты 500 Hz. Конструкция этой печи была запроектирована из маломagnetной стали. Долгое время печь

шению $\frac{b}{a}$ и $\frac{b}{\sqrt{s}}$ по данным Томсона и Мосс было найдено, что размагничивающий фактор $N=0,0324$. Следовательно, размагничивающий коэффициент

$$\mu = \frac{4\pi\mu_1}{4\pi + N(\mu - 1)} = \frac{4\pi \cdot 360}{4 + 359 \cdot 0,0324} = 187.$$

Средняя удельная мощность вихревых токов по формуле (15) $P_{2f}=0,318 \text{ W/cm}^2$; этой мощности соответствует согласно расчету средняя температура швеллера около 180° .

В середине швеллера $H=59,2 \text{ Ое}$; $\mu_1=240$ и $\mu=134$. Удельная мощность $P_{2f}=0,514 \text{ W/cm}^2$ и, следовательно, максимальная температура швеллера должна быть около 245° .

Проведенные вычисления показывают, что нагрев вертикального швеллера чрезмерно высок. Это полностью подтверждалось наблюдениями за работающей печью. Во избежание такого нагрева швеллера была применена экранировка его листовой медью.

Литература

1. М. Струтт. Об индукционном нагреве. „Archiv f. Electrotechnik“. В. XIX, § 424, 1928.
2. М. Струтт. К теории индукционного нагрева. „Annalen der Physik“. В. 82, S. 605, 1927.
3. В. Фишер. Теоретические основы бессердечникового

индукционного нагрева. „Elektrowärme“. S. 41—43, № 2, и S. 67—69, № 3, 1932.

4. В. Эсмарх. К теории бессердечниковых индукционных печей. Wissenschaftliche veröffentlicht. aus dem Siemens-Kommissionen. вып. 2, стр. 172—196; март, т. X, 1931.

5. Бюне. Индукционный нагрев. „Bulletin de la Société Française des Electriciens. Август, стр. 940—992, 1928.

6. Burch and Davis, An Introduction to the Theory of Eddy — Current Heating, 1928.

7. Г. Б. Двойт и М. М. Багай. Вычисление электрических характеристик индукционных печей. „Electrical Engineering“, 1935.

8. Д. А. Райт. Нагрев сложных цилиндрических систем вихревыми токами. „Philosophical Magazine and Journal of Science“. Июль, серия 7, т. 24, № 159, 1937.

9. В. М. Рудзик. Основания теории и расчета индукционных бессердечниковых печей. „Металлург“, стр. 77—80, № 3, 1936.

10. Э. Розенберг. Вихревые токи в массивном железе. ETZ, т. 44, вып. 22, стр. 513—518, 1923.

11. Thomson. „The Electrician“, XXVIII, стр. 599, 1891.

12. Neviside. „The Electrician“. XII, стр. 583, 1884.

13. К. Фэльш. Магнитное поле и самоиндукция цилиндрической катушки. „Archiv für Elektrotechnik“, XXX, вып. 1, 1936.

14. А. С. Займовский и др. Железные шины. ОНТИ Энергосбыт, 1934.

15. И. А. Торопов. К вопросу нагрева вихревыми токами металлических частей опорной конструкции промышленной индукционной печи „высокой“ частоты. Диссертация ЛГУ, 1939.

16. Е. Г. Марквардт. Электромагнитные расчеты трансформаторов. ОНТИ, НКТП СССР, 1938.

17. S. P. Thompson, E. W. Moss. „Phil. Mag. sec. V. 16, 729, 1909.

ИЗ РАБОТ СОВЕТСКИХ ЭЛЕКТРОТЕХНИКОВ*

Определение сопротивления для получения заданных условий работы

Р. Л. АРОНОВ

Харьковский электротехнический институт

При проектировании систем управления машинами постоянного тока приходится определять величину сопротивлений для получения нужной скорости при заданном моменте нагрузки. Методы решения таких обратных задач были разработаны¹ автором в 1936 г. При их практическом применении выявилась целесообразность дальнейшей разработки этого вопроса.

При переходе от одной ступени контроллера к другой удобно изменять лишь одно сопротивление в сложной схеме (рис. 1), причем требуется, чтобы новая характеристика прошла через заданную точку (n, M). Такая задача легко решается, если неизвестно R_{α} , и несколько сложнее, когда надо найти R_c или R_{ω} .

Приведем без вывода основные соотношения²:

$$n = \left[\frac{R_{\omega}}{R_{\omega} + R_c} - \left(\frac{R_{\omega}}{R_{\omega} + R_c} \cdot \frac{R_c}{R_{\alpha}} + \frac{R_{\alpha}}{R_{\alpha}} \right) \frac{I_{\alpha}}{I_n} \right] n_{2\theta}; \quad (1)$$

$$I_c = \frac{U + R_{\omega} I_{\alpha}}{R_{\omega} + R_c}; \quad (2)$$

$$I_{\omega} = \frac{U - R_c I_{\alpha}}{R_{\omega} + R_c}; \quad (3)$$

$$\frac{M n_{2\theta}}{I_{\alpha}} = k, \quad (4)$$

где k с достаточным для практики приближением можно считать постоянной величиной для данной машины.

Обозначим для краткости в дальнейшем

$$\frac{R_{\omega}}{R_{\omega} + R_c} = A.$$

1. Заданы R_{ω} и R_c , неизвестно R_{α} , характеристика должна пройти через точку n, M .

После вычисления A получаем по уравнениям (2) и (4) (3) и (4) в зависимости от схемы включения уравнение той, пересечение которой с граничной характеристикой искомого $n_{2\theta}$ и I_{α} . Далее по уравнению (4) найдем I_{α} ; при данном n уравнение (1) позволит найти R_{α} . Выведем ходимые формулы.

Схема по варианту II.

$$I_{\alpha} = I_c = \frac{R_{\omega}}{R_{\omega} + R_c} \left(\frac{U}{R_{\omega}} + \frac{M_1}{k} n_{2\theta} \right) = A \left(\frac{U}{R_{\omega}} + \frac{M_1}{k} n_{2\theta} \right);$$

$$n = \left[A - \left(A \frac{R_c}{R_{\alpha}} + \frac{R_{\alpha}}{R_{\alpha}} \right) \frac{I_{\alpha}}{I_n} \right] n_{2\theta}.$$

Схема по варианту III.

$$I_{\alpha} = I_{\omega} = \frac{R_c}{R_{\omega} + R_c} \left(\frac{U}{R_c} - \frac{M_1}{k} n_{2\theta} \right) = (1 - A) \left(\frac{U}{R_c} - \frac{M_1}{k} n_{2\theta} \right),$$

уравнение (7) сохраняет свою силу.

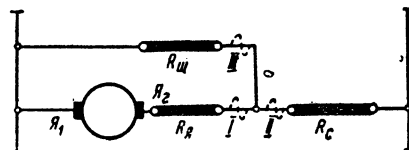


Рис. 1

*В этом разделе помещаются краткие сообщения инженеров и научных работников о своих теоретических, экспериментальных, расчетных, конструкторских и других работах.

¹ Сборник ХЭТИ № 4, Рациональные методы построения искусственных характеристик машин постоянного тока.

² Р. Л. Аронов, Электрооборудование промышленных приводов, гл. IV, § 3.

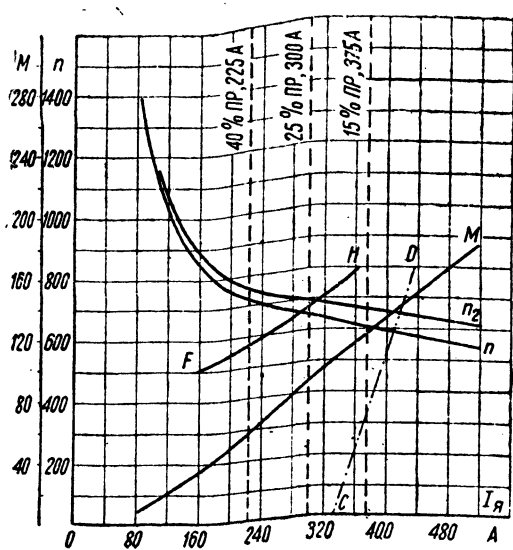


Рис. 2

2. Заданы R_c и R_{π} , неизвестно R_{ω} .
Схема по варианту II.

$$I_s = I_c = \frac{R_c}{R_{\omega} + R_c} \cdot \frac{U}{R_c} + \frac{R_{\omega}}{R_{\omega} + R_c} I_A = (1-A) \frac{U}{R_c} + A \frac{M_1}{k} n_{28}; \quad (9)$$

$$n_1 = \left[A - \left(A \frac{R_c}{R_{\pi}} + \frac{R_{\pi}}{R_{\pi}} \right) \frac{M_1}{k} n_{28} \frac{1}{I_{\pi}} \right] n_{28}. \quad (10)$$

По (9)

$$I_s = \frac{U}{R_c} + A \left(\frac{M_1}{k} n_{28} - \frac{U}{R_c} \right); \quad (11)$$

по (10)

$$A = \frac{\frac{n_1}{n_{28}} + \frac{R_{\pi} M_1}{R_{\pi} k} \frac{1}{n_{28} I_{\pi}}}{1 - \frac{R_c}{R_{\pi}} \frac{M_1}{k} n_{28}} = \frac{\frac{n_1}{n_{28}} + \frac{R_{\pi} M_1}{U k} n_{28}}{\frac{U}{R_c} - \frac{M_1}{k} n_{28}} \quad (12)$$

или, подставляя значение A из (12) в (11), получим:

$$I_s = I_c = \frac{U}{R_c} \left(1 - \frac{n_1}{n_{28}} - \frac{R_{\pi} M_1}{U k} n_{28} \right) = \varphi(n_{28}). \quad (13)$$

Пересечение кривой, выражаемой уравнением (13), с граничной характеристикой определит искомые n_{28} и I_s , далее уравнение (12) позволит найти значение A , а следовательно, R_{ω} .

Схема по варианту III.

Решение для A [уравнение (12)] остается без изменения. Зависимость тока возбуждения от тока якоря определяется уравнением (3):

$$I_s = I_{\omega} = \frac{R_c}{R_{\omega} + R_c} \left(\frac{U}{R_c} - I_A \right) = (1-A) \left(\frac{U}{R_c} - \frac{M_1}{k} n_{28} \right)$$

или, подставляя значение A из (12),

$$I_s = I_{\omega} = \frac{U}{R_c} \left(1 - \frac{n_1}{n_{28}} - \frac{R_c + R_{\pi}}{U} \frac{M_1}{k} n_{28} \right). \quad (14)$$

3. Заданы R_{ω} и R_{π} , неизвестно R_c .
Схема по варианту II.

$$I_s = I_c = \frac{R_{\omega}}{R_{\omega} + R_c} \left(\frac{U}{R_{\omega}} + I_A \right) = A \left(\frac{U}{R_{\omega}} + \frac{M_1}{k} n_{28} \right); \quad (15)$$

$$n_1 = \left[A - \left(\frac{1-A}{R_{\pi}} R_{\omega} + \frac{R_{\pi}}{R_{\pi}} \right) \frac{M_1}{k} n_{28} \frac{1}{I_{\pi}} \right] n_{28}. \quad (16)$$

Из (16) следует:

$$A = \frac{\frac{n_1}{n_{28}} + \frac{R_{\omega} + R_{\pi}}{U} \frac{M_1}{k} n_{28}}{1 + \frac{R_{\omega} M_1}{U k} n_{28}}. \quad (17)$$

Подстановка (17) в (15) приводит к:

$$I_s = I_c = \frac{U}{R_{\omega}} \left(\frac{n_1}{n_{28}} + \frac{R_{\omega} + R_{\pi}}{U} \frac{M_1}{k} n_{28} \right). \quad (18)$$

Пересечение кривой $I_s = \varphi(n_{28})$ согласно (18) с граничной характеристикой определит I_s и n_{28} , после чего по (17) найдем A и R_c .

Схема по варианту III.

Решение, как и для схемы II, но уравнение (15) надо заменить на:

$$I_s = I_{\omega} = A \frac{U}{R_{\omega}} - (1-A) \frac{M_1}{k} n_{28} = A \left(\frac{U}{R_{\omega}} + \frac{M_1}{k} n_{28} \right) - \frac{M_1}{k} n_{28} \quad (19)$$

или, используя уравнение (17), приходим к соотношению:

$$I_s = I_{\omega} = \frac{U}{R_{\omega}} \left(\frac{n_1}{n_{28}} + \frac{R_{\pi}}{U} \frac{M_1}{k} n_{28} \right), \quad (20)$$

с помощью которого получим результат, следуя выше намеченным путем.

При применении предлагаемых методов решения следует следить за правильной расстановкой знаков. Под M и I следует подразумевать алгебраические величины, т. е. при переходе к численным значениям надо следить не только за абсолютной величиной, но и за знаком результата или подставляемого числа. I_s всегда существенно положительная величина, так как ток возбуждения в серийной машине не может доходить до нуля. Уравнения пригодны лишь для схемы прямого включения. Для схемы обратного включения следует изменить знаки у n_{28} и I_A . Проще, однако, при вычислении сопротивлений для этого случая пользоваться точкой на координатном поле с радиусом-вектором того же модуля, но повернутым на 180° .

Пример 1. Серийный двигатель типа КПД 400/516 включен по схеме вариант III с сопротивлениями $R_c = 40\% R_{\pi}$; $R_{\omega} = 50\% R_{\pi}$.

Данные двигателя: $U = 220$ В; при 25% ПР $I_{\pi} = 300$ А; $P_{\pi} = 60$ кВт; $M = 90$ кгм; $n = 650$ об/мин; $k = 205$.

При токе якоря $I_A = 0$; $I_{\omega} = I_s = \frac{U}{R_{\omega} + R_c} = \frac{U}{R_{\omega} + R_c} = I_{\pi} \frac{R_{\pi}}{R_{\omega} + R_c} = \frac{300}{0,9} = 333$ А. По граничной характеристике, построенной на рис. 2, находим $n_{28} = 685$ об/мин. В таком случае при пересечении характеристики с осью ординат получим

$$n_{02} = \frac{R_{\omega}}{R_{\omega} + R_c} n_{28} = \frac{0,5}{0,9} 685 = 381 \text{ об/мин.}$$

В тормозных квадрантах абсолютные значения ординат должны превосходить это значение.

Вычислим сопротивление R_{π} , необходимое для того, чтобы характеристика прошла через точку $M_1 = -60$ кгм; $n = 550$ об/мин.

По формуле (5) $A = \frac{5}{9}$; по уравнению (8):

$$I_{\omega} = I_s = \frac{1000}{3} + \frac{80}{615} n_{28}.$$

Если бы мы выбрали аналогичную точку в четвертом квадранте: $M = 60$ кгм, $n = -550$ об/мин, то пришли к тем же численным соотношениям, так как надо было в уравнении (8) изменить знак у n_{28} .

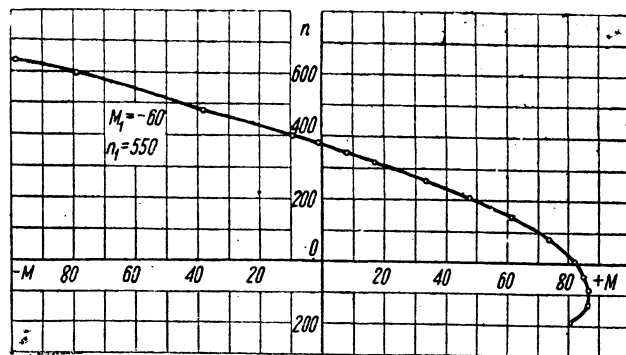


Рис. 3

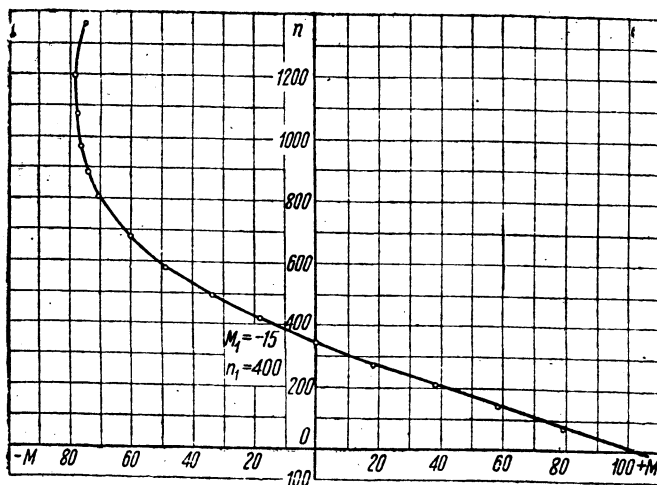


Рис. 4

Находим две точки прямой CD (рис. 2): $n_{28}=0$; $I_{\phi}=333$ А; $n_{28}=615$; $I_{\phi}=413$. По этим двум точкам строим прямую CD , ее пересечение с граничной характеристикой определяет:

$$n_{28}=650; I_{\phi}=416; I_{\phi} = \frac{M_1 n_{28}}{k} = -\frac{60 \cdot 650}{205} = -190 \text{ А.}$$

Тогда по уравнению (1)

$$n_1 = 550 = \left[\frac{5}{9} + \left(\frac{5}{9} \cdot 0,4 + \frac{R_{\phi}}{R_{\kappa}} \right) \frac{190}{300} \right] \cdot 650,$$

откуда $R_{\phi} = 0,238 R_{\kappa}$, и уравнение характеристики:

$$n = \left(0,556 - 0,461 \frac{I_{\phi}}{300} \right) n_{28};$$

$$I_{\phi} = I_{\phi} = \frac{4}{9} \left(\frac{300}{0,4} - I_{\phi} \right) = 333 - 0,445 I_{\phi}.$$

По этим двум формулам с помощью рис. 2 строим характеристику $n=f(M)$ на рис. 3.

Ток I_{ϕ} во втором квадранте надо считать отрицательным, так как момент отрицателен, также для четвертого квадранта, так как мы переключили концы якорной обмотки.

Пример 2. Необходимо при тормозном моменте $M_1 = -15$ кгм получить скорость $n_1 = 400$ об/мин путем подключения шунтирующего сопротивления к схеме с сопротивлением общей цепи $R = 70\% R_{\kappa}$. Шунтирующая цепь подключается так, чтобы обмотка возбуждения обтекалась током сети, причем $R_c = 45\% R_{\kappa}$; $R_{\phi} = 25\% R_{\kappa}$. Машина та же, что в примере 1.

По уравнению (13)

$$I_c = \frac{2}{3} 10^3 \left(1 - \frac{400}{n_{28}} + \frac{n_{28}}{16400} \right).$$

Вычисляем ряд точек:

n_{28}	800	750	700	650	600	550	500
I_c	366	342	314	283	247	204	156

и по ним строим кривую FH (рис. 2).

Пересечение с пограничной характеристикой дает:

$$n_{28} = 695 \text{ об/мин; } I_c = I_{\phi} = 310 \text{ А,}$$

откуда по (12) $A = 0,496$ и далее

$$R_{\phi} = \frac{A}{1-A} \cdot R_c = \frac{0,496}{0,504} \cdot 0,45 R_{\kappa} = 0,444 R_{\kappa}.$$

Уравнение характеристики:

$$n = \left[0,496 - 0,483 \frac{I_{\phi}}{I_{\kappa}} \right] n_{28};$$

$$I_c = 0,496 \left(\frac{300}{0,444} + I_{\phi} \right) = 335 + 0,496 I_{\phi}.$$

Далее построение производится обычным способом. Результаты даны на рис. 4.

Учет размагничивающего влияния тока к. з. при определении размеров постоянных магнитов машин переменного тока

А. С. КАНТЕР

Всесоюзный электротехнический институт

Магнитная энергия, развиваемая постоянным магнитом в внешнем пространстве

$$A = \frac{BHV}{8\pi}.$$

Значения B и H могут быть легко определены известными размерами постоянного магнита и магнитной цепи. Объем же магнита может быть, понятно, получен при известных значениях сечения магнита S и длины его l . Ниже показано, что для работы машины далеко небезразлично как образован объем постоянного магнита.

Ударные токи к. з., как известно, размагничивают или иной степени постоянные магниты машин переменного тока [2]. Степень размагничивания зависит от момента защитного воздействия демпферной обмотки или действующей как демпфер сплошных полюсных наконечников из мягкого железа [4] и не зависит от числа витков обмотки ротора.

Последнее положение можно обосновать следующими элементарными соображениями.

Максимальный ударный ток, получающийся в машине при первом к. з., при максимальном намагничивании полюсов магнитов зависит, при прочих равных условиях, от реактансы рассеяния.

Значения ударного тока к. з. для машин с электромагнитным возбуждением могут быть определены по формулам

$$I_{y\phi} = \frac{2\sqrt{2} k E}{X_1' + X_2'},$$

где k — коэффициент, зависящий от активного сопротивления и индуктивности фазы статора и ротора; X_1' — реактанса сопротивления рассеяния одной фазы якорной обмотки; X_2' — приведенное к якору реактивное сопротивление роторной обмотки [3].

В рассматриваемых машинах вместо катушки ротора (с демпфером) имеются сплошные постоянные магниты. При этом в постоянных магнитах образуются токи Фуко и возникают потери на гистерезис, влияющие, в свою очередь, на протекание этого нестационарного процесса.

По этому в случае машин с постоянными магнитами можно сказать, что ток к. з. определяется каким-то общим реактивным и активным сопротивлением равным $Z_{y\phi}$.

Размагничивающие постоянный магнит ампервитки от действия ударного тока

$$AW_{y\phi} = \frac{c E_1 w_1}{Z_{1y\phi}}.$$

где c — коэффициент, зависящий от параметров машины. Из этого выражения видно, что размагничивающие ампервитки не зависят от числа витков статора. Действительно, если увеличить витки статора, например, в k раз, то также увеличится в k раз, Z возрастет в k^2 . Следовательно $AW_{y\phi}$ не претерпит изменений.

Представим себе далее, что, сохраняя неизменным объем постоянных магнитов, выполним машину в двух вариантах. Первый вариант — сечение магнита S_1 и длина l_1 и второй с сечением магнита S_2 и длиной l_2 , причем

$$V = S_1 l_1 = S_2 l_2.$$

При этом

$$S_2 = k S_1; \quad l_2 = \frac{l_1}{k}.$$

Примем далее, что проводимость магнита в машине будет на таком образом, что индукции в воздушном зазоре в обоих вариантах мало отличаются друг от друга. Допустим произвольное, но имеющее место в действительности сравнительно небольших изменений параметров машины.

Для упрощения дальнейших выводов примем также обе машины выполненными с одним и тем же числом витков. Такое предположение допустимо, так как выше было показано, что удельные размагничивающие ампервитки не зависят от числа витков.

Удельные размагничивающие ампервитки для первого янанта

$$aw_1 = \frac{cE_1w_1}{l_1Z_{1y0}};$$

и второго

$$aw_2 = \frac{cE_2w_1}{l_2Z_{2y0}}.$$

$E_2 = kE_1$, так как полезный поток вследствие увеличения сечения возрос в k раз. Считаем, что поток рассеяния на 1 ст длины витка остался без изменения. Средняя длина витка увеличилась одновременно с сечением в \sqrt{k} раз. Поэтому $Z_{y0} = \sqrt{k} Z_{1y0}$, и удельные ампервитки

$$aw_2 = \frac{cE_2w_1}{l_2Z_{2y0}} = \frac{ckE_1w_1}{l_1\sqrt{k}Z_{1y0}} = k\sqrt{k}aw_1.$$

Из приведенных выше соотношений совершенно очевидно, что конфигурация постоянного магнита — отношение площади сечения магнита к его длине, влияет в значительной степени на размагничивание магнита ударными токами к. з.

Литература

1. А. С. Кантер. Постоянные магниты. Изд. ОНТИ, 1938.
2. А. С. Кантер. Критическая точка магнитного состояния постоянных магнитов в электрических машинах переменного тока. Академия наук СССР. Известия отделения технических наук № 10, 1939.
3. Р. Рихтер. Электрические машины, т. 2. Синхронные машины и одноякорные преобразователи. Изд. ОНТИ, стр. 283, 1936.
4. А. С. Кантер. О нестационарных явлениях в электрических машинах переменного тока с возбуждением постоянными магнитами. Академия наук СССР. Известия отделения технических наук № 4, 1940.

Вычисление тока к. з. гидрогенератора для больших отрезков времени

В. Н. ЛЕБЕДЕВ
Днепроэнерго

В некоторых случаях приходится вычислять изменение во времени тока статора гидрогенератора для отрезков времени порядка 5—7 сек при трехполюсном к. з. вблизи гидрогенератора, отсекающем его от остальной системы. При этом может оказаться, что напряжение на зажимах возбудителя будет изменяться не по обычной кривой, близкой к экспоненциальной функции, — а по более сложной кривой, например, подобно показанной на рис. 1. Это объясняется торможением в некоторых случаях возбудительного агрегата при полном к. з. гидрогенератора [1, 2].

Рассматривается трехполюсное к. з. либо на шинах гидростанции, либо в самой непосредственной близости от шин, тогда реактансом от шин до места к. з. можно пренебречь. Следовательно, цепь статора до места к. з. можно считать чисто реактивной.

В таком случае изменение тока к. з. не зависит от скорости вращения гидрогенератора и для любого момента времени действующее значение периодической составляющей к. з.

$$I_k = \frac{E_d}{X_d + X_T}, \quad (1)$$

E_d — э. д. с. возбуждения, отнесенная к номинальной скорости вращения гидрогенератора;

X_d — синхронный реактанс гидрогенератора при номинальной частоте;

X_T — реактанс повысительного трансформатора при той же частоте.

Изменение э. д. с. возбуждения во времени, как известно определяется уравнением:

$$T_d' \frac{dE}{dt} + E - u = 0. \quad (2)$$

$$T_d' = T_0 \frac{X_d' + X_T}{X_d + X_T} \text{ — переходная постоянная времени}$$

цепи возбуждения при замкнутой цепи статора; u — напряжение на зажимах возбудителя в относительных единицах, выбранных так, что $u=1$, когда $E_d=1$ в нормальном режиме холостого хода и при горячей обмотке ротора; $E=E_d$ (индекс опускаем для простоты написания)

В рассматриваемом случае, когда $u=f(t)$ имеет вид, подобный кривой рис. 1, уравнение (2) может быть решено лишь методами численного интегрирования. Можно, например, воспользоваться формулой Лонглея [4]:

$$E_{n+1} = E_n - (E_n - u_{n(n+1)}) \frac{\Delta t}{T_d'}, \quad (3)$$

где E_n, E_{n+1} — значения E для моментов времени t_n и t_{n+1} соответственно; $\Delta t = t_{n+1} - t_n$ — интервал времени $t_n = n\Delta t$;

$$u_{n(n+1)} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_n}^{t_{n+1}} u dt; \quad (4)$$

и определяется из заданной кривой $u=f(t)$.

Исходя из уравнения (2), формулу Лонглея можно получить следующим образом.

Решение уравнения (2) дает:

$$E = E_{(+0)} e^{-kt} + k e^{-kt} \int u e^{kt} dt. \quad (5)$$

Здесь $E_{(+0)} = [E_d]_{t=+0}$ и $R = \frac{1}{T_d'}$.

Написав выражение (5) для моментов времени t_{n+1} и t_n , вычтя одно из другого и сделав некоторые преобразования, получим:

$$E_{n+1} = E_n e^{-k\Delta t} + e^{-kt_{n+1}} \int_{t_n}^{t_{n+1}} u k e^{kt} dt. \quad (6)$$

Интеграл

$$A_n = e^{-kt_{n+1}} \int_{t_n}^{t_{n+1}} u k e^{kt} dt. \quad (7)$$

На основании теоремы о среднем можно представить таким образом:

$$A_n = k e^{-k(t_{n+1}-t_c)} \int_{t_n}^{t_{n+1}} u dt = \frac{\Delta t}{T_d'} u_{n(n+1)} e^{-\frac{t_{n+1}-t_c}{T_d'}}; \quad (8)$$

$$t_n < t_c < t_{n+1}. \quad (9)$$

Так как t_c , вероятно, мало отличается от $t_{n+\frac{1}{2}} = t_{n+1} - \frac{\Delta t}{2}$, то, положив $t_c = t_{n+\frac{1}{2}}$, получим:

$$A_n \approx \frac{\Delta t}{T_d'} u_{n(n+1)} e^{-\frac{\Delta t}{2T_d'}}. \quad (10)$$

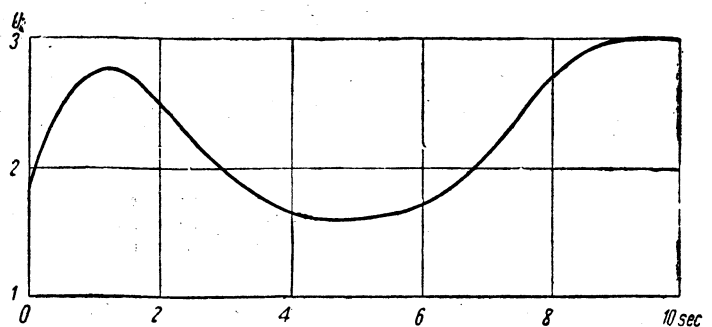


Рис. 1. Изменение напряжения возбудителя во времени

Допустив, при достаточно малом Δt , что $e^{-\frac{\Delta t}{T_d}} \approx 1 - \frac{\Delta t}{T_d}$ и $E_n e^{-\frac{\Delta t}{T_d}} \approx E_n \left(1 - \frac{\Delta t}{T_d}\right)$, из (6), (7) и (10) получаем формулу (3) Лонгеля.

Как видим, применение формулы Лонгеля возможно лишь при достаточно малых интервалах времени. При вычислениях для больших отрезков времени ее применение приводит к необходимости разбивать их на 100—150 интервалов и вычисления становятся очень утомительными и требуют много времени.

Для увеличения интервала можно прибегнуть к такому приему.

Интеграл (7) решается с помощью параболического интерполирования $u = f(t)$. Аппроксимируем в n -ом интервале 1 действительную кривую $u = f(t)$ выражением:

$$u = at^2 + bt + c. \quad (11)$$

Коэффициенты a и b в (11) определяются для n -го интервала из системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} at_n^2 + bt_n + c &= u_n; \\ a \left(t_n + \frac{1}{2} \Delta t\right)^2 + b \left(t_n + \frac{1}{2} \Delta t\right) + c &= u_{n+\frac{1}{2}}; \\ a (t_n + \Delta t)^2 + b (t_n + \Delta t) + c &= u_{n+1}. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Здесь u_n , $u_{n+\frac{1}{2}}$ и u_{n+1} — значения u из действительной кривой $u = f(t)$ соответственно для моментов времени t_n , $t_{n+\frac{1}{2}}$ и t_{n+1} .

Определив из (12) коэффициенты a и b , подставив их в (11), затем (11) в (7), после интегрирования получим:

$$\begin{aligned} A_n &= u_{n+1} \left[1 - \frac{4}{x} + \frac{1-e^{-x}}{x} + 4 \frac{1-e^{-x}}{x^2} \right] + \\ &+ 4u_{n+\frac{1}{2}} \left[\frac{2}{x} - \frac{1-e^{-x}}{x} - \frac{1-e^{-x}}{x^2} \right] + \\ &+ u_n \left[-e^{-x} - \frac{4}{x} + 3 \frac{1-e^{-x}}{x} + 4 \frac{1-e^{-x}}{x^2} \right]. \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь

$$x = k\Delta t = \frac{\Delta t}{T_d}.$$

Выражение (13) упрощаем следующим образом: разлагаем e^{-x} в ряд и отбрасываем все члены, содержащие x^3 и выше степени x . Тогда получим:

$$A_n \approx u_{sn}^{(1)} \frac{\Delta t}{T_d} - u_{sn}^{(2)} \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta t}{T_d} \right)^2, \quad (14)$$

где

$$u_{sn}^{(1)} = \frac{u_{n+1} + 4u_{n+\frac{1}{2}} + u_n}{6}; \quad (15)$$

$$u_{sn}^{(2)} = \frac{u_n + 2u_{n+\frac{1}{2}}}{3}. \quad (16)$$

Интересно отметить, что $u_{sn}^{(1)} = u_{n(n+1)}$ при замене в n -ом интервале действительной кривой $u = f(t)$ параболой (11). Представим

$$E_n e^{-\frac{\Delta t}{T_d}} \approx E_n \left[1 - \frac{\Delta t}{T_d} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta t}{T_d} \right)^2 \right]. \quad (17)$$

¹ Нумерация интервала принята следующая: первый интервал получает номер 0, второй 1 и т. д., так что $E_{n+1} = E_n + \Delta E_n$.

Подставляя (14) и (17) в (6), получим:

$$\begin{aligned} E_{n+1} &= E_n - (E_n - u_{sn}^{(1)}) \frac{\Delta t}{T_d} + \\ &+ (E_n - u_{sn}^{(2)}) \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta t}{T_d} \right)^2. \end{aligned}$$

Так как третий член правой части в этом вымного меньше второго, то можно положить $u_{sn}^{(2)} \approx 0$, тогда

$$\begin{aligned} E_{n+1} &= E_n - (E_n - u_{sn}^{(1)}) \frac{\Delta t}{T_d} + \\ &+ (E_n - u_{sn}^{(1)}) \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta t}{T_d} \right)^2. \end{aligned}$$

Если отбросить третий член правой части, то

$$E_{n+1} = E_n - (E_n - u_{sn}^{(1)}) \frac{\Delta t}{T_d}.$$

Выражение (20) весьма сходно с формулой Лонгеля. Формулы (18) и (19) имеют по сравнению с формулой (20) преимущество к нашему случаю то преимущество, которое позволяют производить вычисления с достаточной степенью точности для сравнительно больших интервалов по 0,5 сек. Кроме того, практически определение $u_{sn}^{(1)}$ выполняется проще и точнее, чем $u_{n(n+1)}$.

Для сравнительной оценки обоих способов численного интегрирования уравнения (2) сделаем два примерных вычисления.

Пример 1. Выбираем такой вид функции $u = f(t)$, который дает конечное решение уравнения (2). Допустим, это и бывает обычно в действительности, что

$$u = u_\infty - (u_\infty - u_0) e^{-\frac{t}{T_v}},$$

где u_∞ — потолок напряжения возбудителя;
 u_0 — напряжение возбудителя до к. з.;
 T_v — постоянная времени возбудителя.

В этом случае возможно [3] конечное решение уравнения (2), и мы будем иметь хорошую базу для сравнительной оценки различных способов решения уравнения (2). Вычисления $E = f(t)$ производились при следующих данных:

$$E_{(+0)} = 3; T_d' = 5 \text{ сек}; u_0 = 1,5; u_\infty = 3; T_v = 2 \text{ сек}.$$

Точность вычисления — четвертый знак после запятой. В табл. 1 даны абсолютные ошибки вычисленных значений, умноженные на 10^4 . Абсолютная ошибка определяется разностью значений точного и вычисленного по той или иной упрощенной формуле.

Таблица

Формула	t_n в сек	1	2	3	4	5
	Δt в сек					
(18)	0,5	-5	-6	-9	-7	-5
Лонгеля	0,05	+1	+8	+3	0	-3
Лонгеля	0,2	+36	+43	+40	+30	+11
(20)	0,2	+40	+50	+45	+33	+21

Как видим, формула (18) при $\Delta t = 0,5$ сек и формула Лонгеля при $\Delta t = 0,05$ сек дают одинаковую точность, при монотонном ходе накопления ошибок не обнаруживается.

Пример 2. Переходим к вычислениям $E = f(t)$ для случая, когда $u = f(t)$ имеет вид кривой рис. 1. Данные $E_{(+0)} = 3$; $T_d' = 3$ сек; $u_0 = 1,8$; $u_\infty = 3,0$; $T_v = 0,5$ сек.

Вследствие торможения возбудительного агрегата к. з. генератора $u = f(t)$ будет уже не экспоненци-

Формула	t_k в sec Δt в sec	0,6	1,2	2,4	3,6	4,8	6,0	7,2	8,4	9,6	10,8	12,0	Число затраченных часов
(18)	0,3	-4	-5	-5	-7	-13	-12	-7	-5	+1	+3	+3	4,5
(18)	0,6	-21	-28	-30	-42	-44	-46	-19	+11	+28	+32	+26	2,5
(19)	0,6	+9	+12	-20	-42	-44	-46	-19	+21	+28	+32	+26	2,0
Лонглей	0,03	+19	+2	0	+18	+26	+34	+21	+11	-12	-28	-4	18,0

кривой, а изображается кривой рис. 1. В этом случае уравнение (2) не поддается конечному решению. Для того чтобы иметь прочную базу для сравнения, $E=f(t)$ было вычислено по точному методу численного интегрирования [§ 75,5] с использованием четвертых разностей; вычисление производилось с четырьмя знаками после запятой и при $\Delta t=0,06$ sec. В табл. 2 приведены абсолютные ошибки вычисления E , умноженные на 10^4 , и указана затрата рабочего времени в часах по каждому способу.

Из рассмотрения табл. 2 следует, что в случаях, подобных рассматриваемому, когда $u=f(t)$ имеет необычный вид (рис. 1), вычисление $E=f(t)$ наиболее быстро и просто получается при пользовании формулой (19) с Δt порядка 0,5 sec.

Точность вычислений более чем достаточна — в нашем случае абсолютная ошибка не превосходит 0,005, а относительная — 0,25%.

Литература

1. В. А. Толвинский и В. И. Иванов. Требования к системе косвенного индивидуального возбуждения синхронных гидрогенераторов. Сборник „Гидроэнергопроект“, стр. 92, № 5, 1938.
2. В. Н. Лебедев. О косвенном индивидуальном возбуждении гидрогенераторов, журн. „Электричество“ № 4, 1940.
3. И. С. Жданов и С. А. Лебедев. Устойчивость параллельной работы электрических систем, 1934.
4. F. R. Longley. The calculation of alternator swing curves Tr. AIEE, стр. 1129, 1930.
5. Д. Скарборо. Численные методы математического анализа, 1934.

Теория однофазного индукционного регулятора

(Основные положения¹)

Н. В. ГОРОХОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

При условии синусоидального распределения поля вдоль магнитного деления τ для любого угла поворота ротора β по II схеме рис. 1) действительны следующие уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= i_1 Z_1 + i_2 j x_{12} \cos \beta; & \dot{U}_2 &= i_2 Z_2; \\ \dot{U}_1 &= i_2 Z_2 + i_1 j x_{12} \cos \beta + i_3 j x_{23} \sin \beta; & i &= i_1 + i_2; \\ 0 &= i_3 Z_3 + i_2 j x_{23} \sin \beta. \end{aligned} \right\} \quad (a)$$

напряжение сети; Z_1 , Z_2 и Z_3 — соответственно сопротивление обмоток I, 2 и 3; Z_H — сопротивление нагрузки; $x_{12} = \omega M_{12}$ — реактивное сопротивление взаимной индуктивности обмоток I и II; $x_{23} = \omega M_{23}$, то же для обмоток II и III.

Вставив в первое уравнение $\pm i_1 j x_{12} \cos \beta$ и во второе $i_2 \cos \beta$, получим после преобразования следующие

используемый здесь материал является извлечением из „Теория индукционного регулятора“.

уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= i j x_{12} \cos \beta + i_1 Z_1; \\ \dot{U}_1 &= i j x_{12} \cos \beta + i_2 Z_2 + \dot{U}_2; \\ \dot{U}_2 &= i_2 Z_2; & i &= i_1 + i_2. \end{aligned} \right\} \quad (b)$$

Здесь:

$$\begin{aligned} Z_1 &= r_1 + j(x_1 - x_{12} \cos \beta); \\ Z_2 &= r_2 + j x_{23}; \\ r_2 &= r_2 + r_3 \left(\frac{x_{23}}{Z_3} \right)^2 \sin^2 \beta; \\ x_{23} &= x_2 - x_{12} \cos \beta - x_3 \left(\frac{x_{23}}{Z_3} \right)^2 \sin^2 \beta. \end{aligned}$$

Уравнениям (b) соответствует эквивалентная схема рис. 2. Для углов $\beta = 0$ и 180° рис. 2 дает эквивалентную схему для параллельного соединения двух катушек, связанных электрически и индуктивно².

Решая уравнения (a) относительно i_2 , для $\dot{U}_2 = i_2 Z_2$, получим:

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 \frac{(Z_1 - j x_{12} \cos \beta) Z_3 Z_H}{(Z_3 + Z_H) Z_1 Z_3 + Z_1 x_{23}^2 + (Z_3 x_{12}^2 - Z_1 x_{23}^2) \cos^2 \beta}. \quad (c)$$

При холостом ходе $Z_H = \infty$ и

$$\dot{U}_{20\beta} = \dot{U}_1 + \dot{U}_1 \frac{x_{12}}{Z_1} \cdot e^{-j\left(\frac{\pi}{2} + \varphi_{10}\right)} \cos \beta, \quad (c_1)$$

где

$$\operatorname{tg} \varphi_{10} = \frac{x_1}{r_1} = \frac{\omega L_1}{r_1}.$$

Векторная диаграмма согласно уравнению (c₁) приведена на рис. 3. Сдвиг между \dot{U}_1 и $\dot{U}_{20\beta}$ обусловлен влиянием активного сопротивления r_1 .

Уравнение (c) позволяет установить связь между \dot{U}_1 и углом β поворота ротора при условии $U_1 = \text{var}$, $U_2 = \text{const}$ и $Z_H = \text{const}$.

Из уравнения (c)

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 : a = \dot{U}_1 : b$$

² Н. В. Горохов и П. А. Ионкин, Электрические цепи с сосредоточенными постоянными и взаимной индуктивностью. „Электричество“ № 22, 1936.

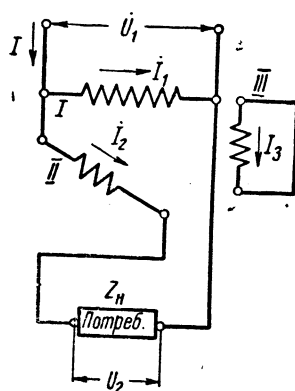


Рис. 1

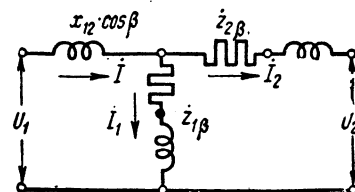


Рис. 2

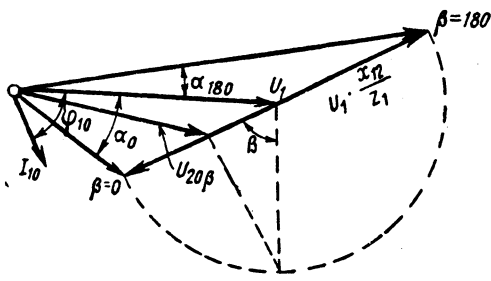


Рис. 3

получим

$$b = \frac{A + Bk^2}{C + Dk}, \text{ где } k = \cos \beta.$$

Непосредственным делением легко получить:

$$b = A_1 + B_1 \cdot k + \frac{1}{C_1 + D_1 \cdot k}.$$

Здесь A_1, B_1, C_1 и D_1 определяются через постоянные индукционного регулятора Z_1, Z_2, Z_3 и Z_N .

На рис. 4 показано построение величины b для некоторых произвольных значений постоянных и на рис. 5 — ее инверсия a .

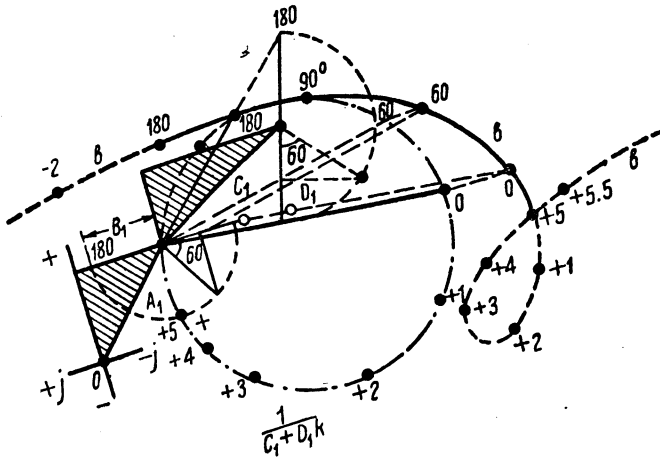


Рис. 4

При изменяющейся величине \dot{U}_1 предельные значения углов поворота ротора β_1 и β_2 можно найти при помощи следующих рассуждений.

Пусть \dot{U}_1 меняется в пределах $U_{1 \min}$ и $U_{1 \max}$. Тогда имеем при $|U_2| = \text{const}$

$$|a_{\max}| = \left| \frac{U_2}{U_{1 \min}} \right| \text{ и } |a_{\min}| = \left| \frac{U_2}{U_{1 \max}} \right|.$$

Радиусами $|a_{\max}|$ и $|a_{\min}|$ засекаем на кривой a точки, дающие при неизменной величине U_2 его фазу по отношению \dot{U}_1 и значения углов β_1 и β_2 (рис. 5).

Последний вопрос, представляющий интерес при этом кратком анализе, — влияние компенсационной обмотки на рабочий процесс индукционного регулятора.

Наиболее простым и наглядным является в этом случае сравнение величин токов \dot{i}'_2 и \dot{i}_2 при наличии компенсационной обмотки III и при ее отсутствии и условии $\dot{Z}_N = 0$.

$$\dot{i}'_2 = \dot{U}_1 \frac{Z_1 Z_3 - Z_3 j x_{12} \cos \beta}{Z_1 Z_2 Z_3 + Z_1 x_{23}^2 + (Z_3 x_{12}^2 - Z_1 x_{23}^2) \cos^2 \beta}.$$

При $Z_3 = \infty$:

$$\dot{i}_2 = \dot{U}_1 \frac{Z_1 - j x_{12} \cos \beta}{Z_1 Z_2 + x_{12}^2 \cos^2 \beta}.$$

³ Для индукционного регулятора реальные пределы значений $k = \pm 1$. Большие значения соответствуют переменной величине M_{12} .

Взяв отношение $\dot{i}_2 : \dot{i}'_2$, получим:

$$\sigma_\beta = \frac{\dot{i}_2}{\dot{i}'_2} = 1 + \frac{Z_1 x_{23}^2 - Z_1 x_{23}^2 \cos^2 \beta}{Z_1 Z_2 Z_3 + Z_3 x_{12}^2 \cos^2 \beta} = \frac{A + B \cos \beta}{C + D \cos \beta}.$$

Это есть уравнение окружности с квадратичным делением точек (переменный параметр $\cos \beta$). Построение следования ее не представляет затруднений.

σ_β — комплексное выражение, следовательно, фазы \dot{i}_2 и \dot{i}'_2 , вообще говоря, различны.

Положив $r_1 = r_2 = r_3 = 0$, после упрощений получим

$$\sigma'_\beta = \frac{\dot{i}_2}{\dot{i}'_2} = 1 - k_{23}^2 \frac{1 - \cos^2 \beta}{1 - k_{12}^2 \cos^2 \beta},$$

где

$$k_{12} = \frac{M_{12}}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

и

$$k_{23} = \frac{M_{23}}{\sqrt{L_2 L_3}}.$$

Для $\beta = 90^\circ$

$$\sigma'_{90} = 1 - k_{23}^2 = \sigma_{23},$$

т. е. получим выражение, дающее коэффициент расхождения обмоток II и III.

Для любого угла поворота ротора β , лежащего между 0 и 180° , коэффициент σ'_β меньше единицы, иначе говоря, вторичной обмотки при отсутствии компенсационной обмотки меньше, чем при наличии ее и эта разница, в свою очередь, определяется постоянными всех трех цепей.

Легко видеть, что при увеличении коэффициента связи второй член выражения для σ'_β увеличивается, так как знаменатель уменьшается. На рис. 6 приведены кривые

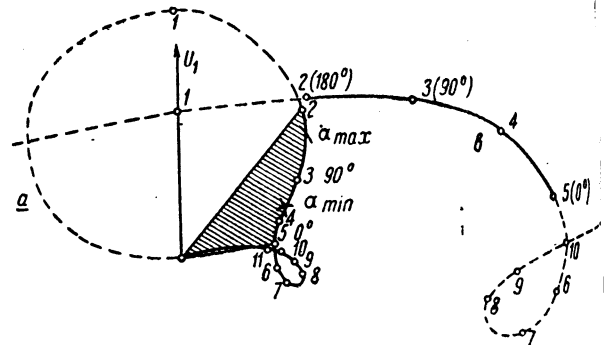


Рис. 5

менения σ'_β в функции угла поворота ротора β , причем кривой I приняты значения $k_{12} = k_{23} = 0,8$, для кривой II $k_{12} = 0,8$ и $k_{23} = 0,5$. При большей величине коэффициента связи k_{23} ток вторичной обмотки I_2 для угла $\beta = 90^\circ$ составляет всего лишь около 35% тока I'_2 , протекающего по цепи при наличии компенсационной обмотки III. Кривая (пунктир) построена для значений $k_{23} = 0,8$ и $k_{12} = 0,5$.

Из сравнения кривых II и III видно, что влияние изменения величины k_{12} на протекание кривой σ'_β весьма незначительно.

В итоге — влияние компенсационной обмотки III можно характеризовать как уменьшающее индуктивное сопротивление обмотки II.

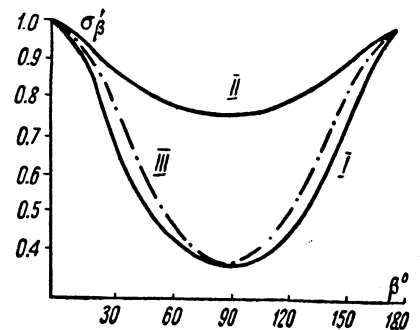


Рис. 6

Из уравнений (а) для токов получим:

$$i_1 = \dot{U}_1 Z'_{1\beta}; \quad i_2 = \dot{U}_1 Z'_{2\beta}; \quad i = \dot{U}_1 Z'_{\beta};$$

$$i_3 = -i_2 j \frac{x_{23}}{Z_3} \sin \beta;$$

$$Z'_{1\beta} = (ZZ_3 + x_{23}^2 - jZ_3 x_{12} \cos \beta - x_{23}^2 \cos^2 \beta) : N;$$

$$Z'_{2\beta} = (Z_1 Z_3 - jZ_3 x_{12} \cos \beta) : N;$$

$$Z'_{\beta} = [Z_3 (Z_1 + Z) + x_{23}^2 - j2Z_3 x_{12} \cos \beta - x_{23}^2 \cos^2 \beta] : N;$$

$$N = ZZ_1 Z_3 + Z_1 x_{23}^2 + (Z_3 x_{12}^2 - Z_1 x_{23}^2) \cos^2 \beta.$$

Исследование полученных уравнений не представляет трудностей.

Отметим здесь, что ни одно из полученных выражений для токов не дает возможности обосновать фразу, приведенную в СЭТ (отд. 37, стр. 124—125): „При повороте ротора и β электрических градусов реактивное сопротивление индуктора сильно увеличивается; для того чтобы оно осталось одинаковым при всех положениях ротора, на таторе устраивают в поперечной оси добавочную компенсационную обмотку, замкнутую накоротко“. Ни одно из полных сопротивлений $Z'_{1\beta}$, $Z'_{2\beta}$, Z'_{β} и реактивных, соответствующих токам i_1, i_2, i не остается постоянным при повороте ротора; они зависят от угла β .

Не представляет труда также исследовать влияние компенсационной обмотки на рабочий процесс поворотной реактивной катушки и поворотного трансформатора.

О работе сухого выпрямителя в режиме кратковременной перегрузки

Н. Н. НИКИФОРОВСКИЙ

Ленинградский завод „Электроаппарат“

Условия создания выпрямителя с минимальным числом элементов при заданной мощности на выходе. Общее число выпрямительных элементов, составляющих схему выпрямителя,

$$N = pqn. \quad (1)$$

Здесь: p — число плеч выпрямителя; q — число параллельных ветвей плеча; n — число последовательно включенных элементов ветви.

Для связи числа параллельных ветвей в плече с другими параметрами для выпрямителя величинами воспользуемся законом Кирхгофа для цепи из выпрямителя и его нагрузки¹.

$$kU_A - U_n = I \frac{np}{q} \xi, \quad (2)$$

Здесь: U_A — линейное напряжение, подводимое к выпрямителю (эффективное значение); U_n — напряжение, подводимое приемнику выпрямленного тока; I — выпрямленный ток; k — сопротивление выпрямительного элемента в пропускном направлении; ξ — коэффициенты, зависящие от схемы включения выпрямителя².

Уравнения (1) и (2) совместно дают выражение, связывающее число элементов в выпрямителе с электрической мощностью, подводимой к приемнику.

$$N = IU_n p n^2 \frac{p \xi}{(kU_A - U_n) U_n}. \quad (3)$$

Зависимость прямого сопротивления медно-закисного выпрямителя от тока для выпрямителей завода им. Казинского (метрами пластин 41/12 при токах перегрузки до 10 А на достаточно точно выражается формулой

$$\rho = a \left(\frac{I}{q} \right)^{-\frac{1}{4}},$$

— коэффициент, устанавливаемый опытным путем.

Выводах пренебрегаем эффектом перекрытия при переключении тока с фазы на фазу.

Рассматриваемых здесь схем: Гретца, однофазной и трехфазной с нулевой точкой коэффициент равен: 0,9; 1,35; 1,17/ $\sqrt{3}$, а ξ равен 2; 2 и 1.

Для рассматриваемых однофазных и трехфазных схем включения элементарных выпрямителей

$$n = \frac{\sqrt{2} U_A}{E},$$

где E — амплитуда допустимого обратного напряжения. Последнее соотношение и выражение для p позволяют привести формулу (3) к такому виду:

$$N = 2^{\frac{7}{6}} \frac{p}{U_n} \left(\frac{a \xi}{kU_A - U_n} \right)^{\frac{4}{3}} \left(\frac{U_A}{E} \right)^{\frac{7}{3}} P, \quad (4)$$

где P — мощность нагрузки в ваттах.

Поиски минимума функции, задаваемой уравнением (4), при переменной величине U_n приводят к установлению зависимости:

$$U_n = \frac{3}{7} kU_A. \quad (5)$$

позволяющей найти выражение для минимального числа выпрямительных элементов в схеме, обслуживающей заданную нагрузку.

Подставляя в (4) значение U_n из (5), получаем после преобразования:

$$N_{\min} = 11 p \frac{(a \xi)^{\frac{3}{7}}}{(E k)^{\frac{3}{7}}} P. \quad (6)$$

Уравнения (5) и (6) позволяют заключить, что для создания выпрямителя с минимальным числом выпрямительных элементов при заданной мощности на выходе P (ватты) необходимо, чтобы рабочее напряжение приемника выпрямленного тока составляло $\frac{3}{7}$ напряжения холостого хода выпрямителя, а расчетная величина обратного напряжения E была выбрана с минимальным коэффициентом запаса. Эти уравнения, кроме того, устанавливают возможность, при соответствующем подборе рабочего напряжения приемника отказаться от предварительной специальной трансформации напряжения и обслуживать нагрузку выпрямителем оптимальных размеров.

Формула (6) показывает, что однофазная схема Гретца, при одной и той же мощности нагрузки P , требует, приблизительно, 1,72 больше элементов, чем трехфазные схемы.

Влияние отклонения от условия оптимума (5) на число элементов выпрямителя. Кривые рис. 1, построенные по формуле (4), показывают, что в известном диапазоне с отклонением напряжения U_n от величины $\frac{3}{7} kU_A$ число элементов

меняется незначительно. В случаях же, требующих доведения до нагрузки напряжения, значительно отличающегося от величины, задаваемой выражением (5), число элементов в выпрямителе резко возрастает. Так, для доведения до нагрузки 24 В при трехфазной схеме Гретца и $U_A = 220$ В необходимое число элементов в 2,7 раза превосходит оптимальное. В подобных случаях становится сомнительной целесообразность применения выпрямителя без специальной предварительной трансформации подводимого напряжения. Отметим, что в рассматриваемом примере трансформация напряжения уменьшает не только число выпрямительных элементов, а значит, и стоимость выпрямителя, но и их токовую загрузку.

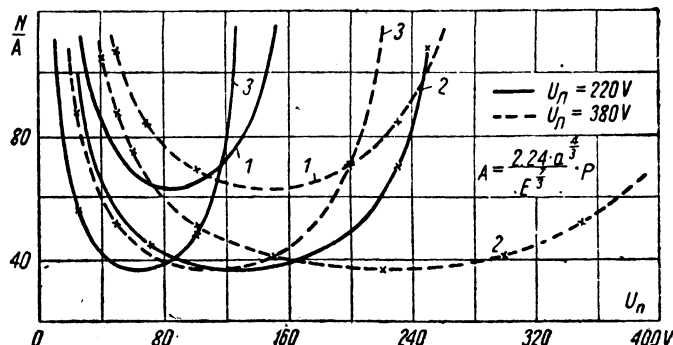


Рис. 1. Кривые зависимости числа элементов, составляющих выпрямитель, от рабочего напряжения нагрузки при ее неизменной мощности. Число элементов приводится в условных единицах.

1 — число элементов для однофазной схемы Гретца; 2 — для трехфазной; 3 — для трехфазной схемы с нулевой точкой

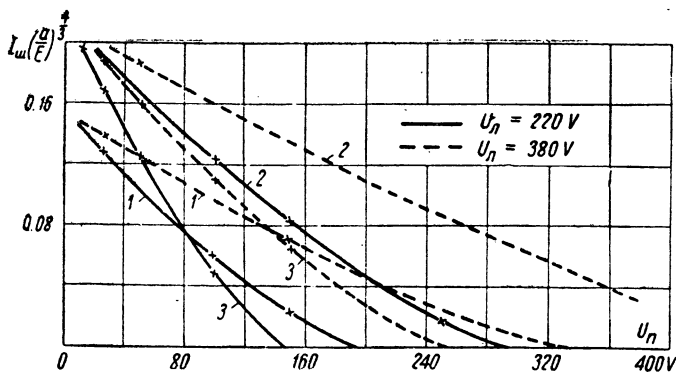


Рис. 2. Кривые зависимости токовой загрузки элемента в схеме выпрямителя от рабочего напряжения нагрузки. Токовая загрузка приводится в условных единицах. 1 — токовая загрузка элемента в однофазной схеме Гретца; 2 — в трехфазной; 3 — в трехфазной схеме с нулевой точкой

Зависимость температуры перегрева выпрямителя от тока загрузки элемента. Токовая загрузка выпрямительного элемента в период протекания тока

$$I_m = \frac{kU_n - U_n}{\xi n p} = \left(\frac{kU_n - U_n}{\xi n a} \right)^{\frac{4}{3}}$$

Как известно, токовая загрузка элементов лимитируется температурой их нагрева. Среднеквадратичное значение этого тока, предопределяющее нагрев элемента, при числе

фаз схемы m и с учетом равенства $n = \frac{\sqrt{2}U_n}{E}$ будет:

$$I_m = \frac{1}{\sqrt{m}} \left[\frac{(kU_n - U_n)E}{\sqrt{2}U_n \xi a} \right]^{\frac{4}{3}} \quad (7)$$

Из уравнения (7) следует, что при расчете нагрузки на напряжение, задаваемое уравнением (5), загрузка выпрямительного элемента не зависит от напряжения, подводимого к выпрямителю и мощности приемника. Для однофазной

схемы получается $I_m = 0,073 \left(\frac{E}{a} \right)^{\frac{4}{3}}$, а для 3-фазных $I_m = 0,103 \left(\frac{E}{a} \right)^{\frac{4}{3}}$.

Общий характер изменения токовой загрузки элемента в зависимости от U_n показан на рис. 2, подсчеты произведены по формуле (7).

При работе сухого выпрямителя в режиме кратковременной перегрузки, практически вся энергия, в нем выделяемая, тратится на нагрев самого выпрямителя. Потери от обратного тока не оказывают заметного влияния на его температуру. Поэтому, если сопротивление выпрямительного элемента в омах составляет r , вес в граммах элемента g , вес радиатора, приходящийся на элемент, g_1 , удельная теплоемкость c $\frac{W \text{ sec}}{g^\circ C}$, то из соотношения:

$$c(g + g_1)\theta = I_m^2 r t,$$

прибегая к простым преобразованиям, получаем, что температура перегрева элемента

$$\theta = \frac{a I_m^{\frac{4}{3}}}{c(g + g_1) m^{\frac{1}{8}}} \cdot t \quad (14)$$

Расчеты выпрямителя, обслуживающего приводы к высоковольтным выключателям. Изложенные соображения были приняты в основу расчета схемы купроксного выпрямителя для обслуживания приводов к высоковольтным выключателям.

Расчету была предпослана экспериментальная работа по определению коэффициента a и величины E . В результате исследования выпрямителей завода им. Казинского с диаметрами пластин 41/12 установлено, что среднее значение коэффициента a при температуре выпрямительного элемента в $+14^\circ$ составляет 1,64 (по данным опыта над 90 элементами),

а при температуре $+35^\circ$ — 1,07 (по данным опыту 15 элементами). Если схему выпрямителя рассчитывать среднюю температуру в $+20^\circ$, то можно считать $a=1$. Для определения допустимого обратного напряжения была собрана трехфазная схема Гретца из 60 элементов с разбивкой элементов в каждом плече на 5 параллельных ветвей. При опытах напряжение повышалось ступенями пробой элементов.

Было установлено, что при двадцатисекундном приложении напряжения к исследуемым элементам, температурой в $+35^\circ$ (к моменту включения напряжения) и при отсутствии нагрузки пробой наступает при 45—55 В на элемент (а точное значение обратного напряжения), а при наличии нагрузки в 4,7 А — при 40—50 В (амплитудное значение напряжения до приложения нагрузки).

В результате экспериментов оказалось возможным при рассматриваемых условиях за допустимую величину величины обратного напряжения $E = 26$ В с учетом того, что повышенное напряжение может составить 115% номинального.

При обслуживании выпрямителем приводов к выключателям имеет место повторно-кратковременная загрузка элементов. Например, для обслуживания группы в 4—5 привода к выключателям ВТ-16, 22, 35, возможное суммарное время загрузки выпрямителя составляет 20 сек при забираемой выпрямителем мощности в 12 кВт (в динамическом режиме работы привода).

Если рассчитывать выпрямитель на наибольшую окружающую температуру в $+35^\circ$ (требование норм на привода к выключателям) и допускать повторение двадцатисекундного цикла загрузки, начиная с температуры выпрямителя в $+40^\circ$ (необходимо для уменьшения времени между циклами загрузки), то можно допустить температуру перегрева выпрямительных элементов до 10° с тем, чтобы температура выпрямителя к концу цикла загрузки при самых неблагоприятных условиях не превысила 50° .

Расчет, произведенный по изложенной выше методике, показал, что при однофазной схеме Гретца допустимый ток загрузки элемента составляет 1,77 А, а при 3-фазной схеме 1,81 А. Число элементов выпрямителя, соответственно — 1 и 1240. Эти величины демонстрируют бесспорное преимущество трехфазных схем, позволяющих собрать выпрямитель из относительно меньшего числа выпрямительных элементов.

Из рассмотренных трехфазных схем, в свою очередь, схема Гретца имеет известные преимущества перед схемой с нулевой точкой.

Лабораторная проверка двух собранных выпрямителей подтвердила полную приемлемость их для обслуживания приводов к высоковольтным выключателям и подтвердила правильность произведенных расчетов.

Применение полупроводников в качестве управляемых сопротивлений

А. Л. ГОРЕЛИК

Харьковский электротехнический институт

Получившие широкое применение управляемые электронные и ионные вентили, как известно, основаны на уникальной проводимости междуэлектродного пространства анода и катода и различных принципах управления междуэлектродным пространством.

Междуэлектродное пространство как электронного, так и ионного управляемого вентиля представляет собой искусственно созданный и далеко несовершенный провод, управляемый электрическим или магнитным полем или током. Качество междуэлектродного пространства электронного прибора с точки зрения проводимости тока в значительной степени уступает металлическому проводнику, однако в ряде приборов в результате компенсации плазмой отрицатель-

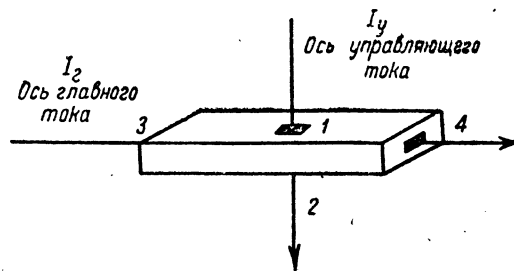


Рис. 1

близкого поля у катода свойства междуэлектродного пространства приближаются к таковым для проводников. В данной статье рассмотрен вопрос о возможности применения в качестве управляемых сопротивлений некоторых искусственно созданных твердых полупроводников с управляемой проводимостью. Испытанию были подвергнуты детали из селита, оцелита и тирита. Наиболее пригодным для решения поставленной задачи оказался тирит.

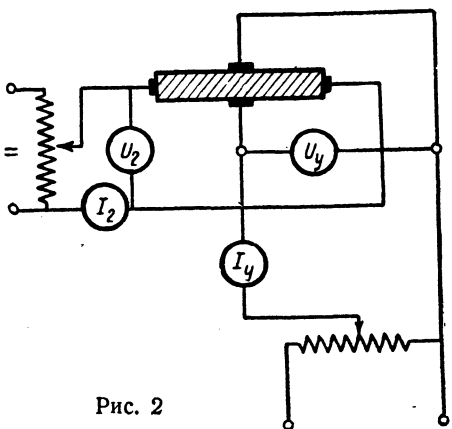


Рис. 2

Автором было экспериментально установлено, что если пластинке тирита (рис. 1) приложить напряжение к зажимам 1, 2, перпендикулярным оси главного тока, то величина тока в направлении главной оси возрастет и будет зависеть от величины напряжения, приложенного к поперечной оси.

Для исследования влияния поперечного напряжения на электропроводность тирита были испытаны бруски с различными линейными размерами. Электрическая схема испытания приведена на рис. 2, где приняты следующие обозначения: I_2 — ток в главной оси, U_2 — напряжение, приложенное к главной оси; I_y — ток в управляющей оси, U_y — напряжение, соответствующее этому току.

Величина тока I_2 в значительной степени зависит от длины пути тока по тириту. Кроме того, величина сопротивления на этом пути зависит от напряжения U_2 .

Если к зажимам управляющего контура приложить напряжение U_y , то сопротивление главного контура уменьшится; с повышением U_2 будет происходить крутое нарастание проводимости главного контура. Кривые $R = f(U_y)$ при $U_2 = \text{const}$ приведены на рис. 3.

Для выяснения некоторых свойств такого управляемого сопротивления, рассмотрим зависимости от управляющего напряжения токов $I_2 = f(U_y)$ и $I_y = f(U_y)$ при $U_2 = \text{const}$,

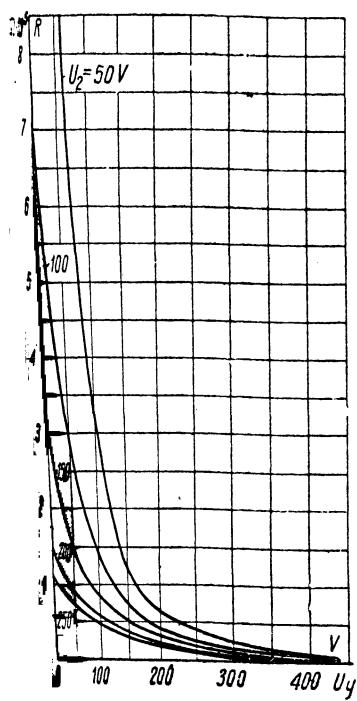


Рис. 3

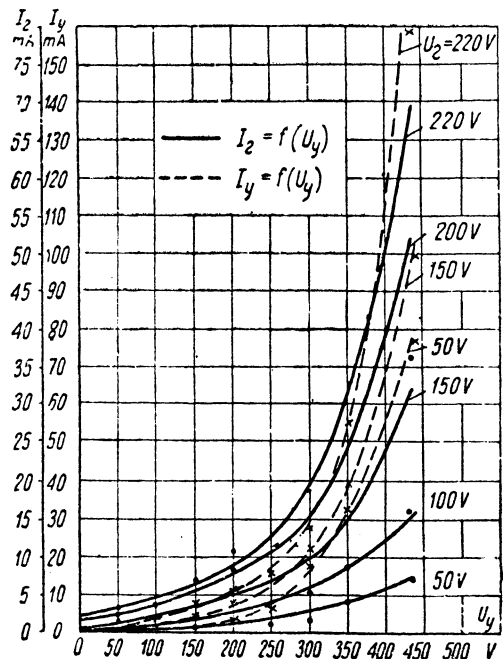


Рис. 4

представленные на рис. 4. Сопоставляя оба семейства кривых I_2 и I_y , мы видим, что управляющий ток I_y превышает ток главной цепи.

На рис. 5 показана зависимость отношения управляющего тока к главному в функции от главного напряжения для двух значений управляющего напряжения: 435 и 250 В. Из этих кривых можно заключить, что управление сопротивлением более рационально при возможно больших значениях

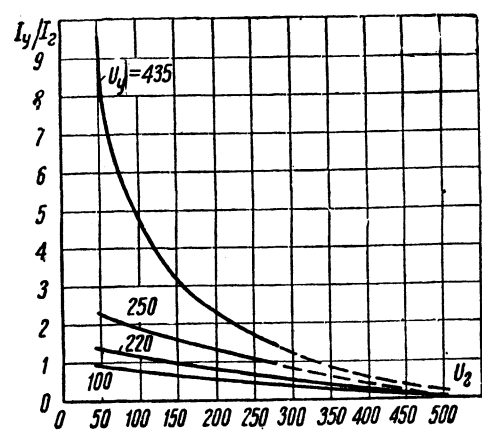


Рис. 5

главного напряжения U_2 и возможно малых управляющего напряжения U_y .

Это положение подтверждается зависимостью мощности главной цепи от мощности управляющей $P_2 = f(P_y)$ при $U_y = \text{const}$ (рис. 6). На рисунке видно, что отношение мощности главного контура к мощности управляющего растет с уменьшением управляющего напряжения.

Исследуемая схема обладает свойством обратимости осей — главной и управления.

Примем ранее управляющий контур за главный, а главный за управляющий. Воспользовавшись данными характеристик, приведенными на рисунке, мы построили известную уже зависимость $\frac{I_y}{I_2} = f(U_2)$ для $U_y = 100$ и $U_y = 220$ В

(рис. 5). Анализируя эти кривые, можно сделать следующее заключение: а) при заданных линейных размерах вентиль более рационален с обращенными осями и б) отношение

$\frac{I_y}{I_2}$ асимптотически приближается к оси U_2 .

Нами исследовалось также влияние формы управляющих электродов на проводимость изучаемого сопротивления.

При изготовлении электродов из различных металлов не наблюдалось изменений в проводимости. Поверхности тирита в местах наложения электродов были металлизированы для устранения влияния величины нажатия на контакты управляющего и главного электродов.

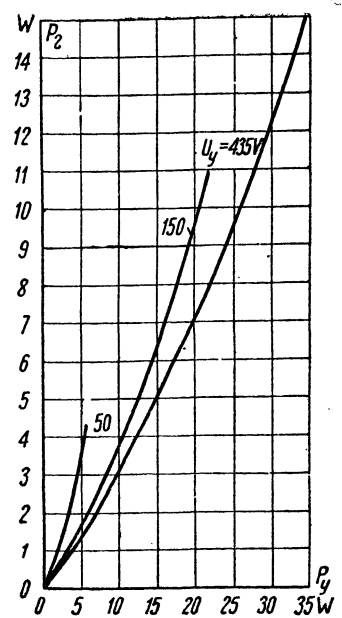


Рис. 6

В данной статье не рассмотрен вопрос теплового режима сопротивления, однако следует отметить рост проводимости как главного, так и управляющего контура в результате нагрева, обусловленного протеканием главного и управляющего токов. В проведенных опытах устранение влияния нагрева было достигнуто ограничением тока на один элемент. Повышение мощности можно получить путем параллельного соединения нескольких элементов как со стороны главного, так и со стороны управляющего контура. Таким образом можно получить управляемое сопротивление на желаемые токи нагрузки главного контура.

Проведенные эксперименты подтверждают возможность применения полупроводников в качестве управляемых сопротивлений, но проделанная работа является лишь начальным этапом решения этой задачи.

Формовка металлических ртутных выпрямителей типа РВ-20/30 методом К. З.

Е. А. МИХАЙЛЕНКО

Отдел электрификации Томской железной дороги

Для обеспечения нормальной работы металлических ртутных выпрямителей в период их монтажа и эксплуатации приходится производить переборку и формовку, которая заключается в откачке газов, окклюдированных нормально находящихся под вакуумом частями и деталями выпрямителя.

Интенсивное выделение окклюдированных газов достигается при формовке повышением температуры отдельных частей выпрямителя путем постепенного увеличения нагрузки для выпрямителей типа РВ-20/30 до 1500—1800 А при

выпрямленном напряжении 100 В, причем регулятор нагрузки производится водяным нагрузочным реостатом. Учитывая то, что падение напряжения в дуге выходящей примерно 30 В, становится ясным, что затрачиваемой при формовке электроэнергии только 30% используется полезно в виде потерь внутри вытеснителя, а остальная электроэнергия теряется в нагрузочном реостате.

Так как нормально ртутные выпрямители с графитовыми анодными головками приходится каждый раз перебирать и формовать дважды, то расход электроэнергии на двойную формовку одного выпрямителя составляет 50 000 кВт·ч, из которых примерно 35 000 кВт·ч теряется совершенно бесполезно в нагрузочном реостате, что является недопустимым.

Отсюда напрашивается вывод о необходимости применения метода формовки выпрямителей по методу К. З.

Этот метод формовки был автором настоящей статьи экспериментально проверен на одной из тяговых подстанций электрифицированного участка Томской железной дороги (рис. 1).

Для обеспечения главного регулирования напряжения, следовательно, и нагрузки короткозамкнутого выпрямителя вначале были применены сварочные трансформаторы, которые дали желательных результатов. Затем по предложению инж. Рябенко Л. И. были использованы сварочные трансформаторы ТС-2, соединенные в каскад с трансформаторами собственных нужд.

Изменением с помощью водяных реостатов тока первичных обмоток сварочных трансформаторов от 0 до 50 А достигалось регулирование напряжения, подведенного к вторичной обмотке силового трансформатора выпрямителя от 100 до 330 В, что обеспечивало плавное регулирование нагрузки короткозамкнутого выпрямителя от 100 до 1500 А. При этом фазовое напряжение равнялось около 20,5 В, ток вторичной обмотки трансформатора собственных нужд достигал 20 А, что соответствует кажущейся мощности 85 кВт. Обычная активная мощность на стороне выпрямленного тока 150 кВт.

Если нагрузку регулировать не сварочными трансформаторами, а потенциал-регулятором [для чего нужен асинхронный двигатель с фазным ротором на ток до 220—250 А напряжением до 75—100 В на фазу ротора, или трансформатор с короткозамкнутыми подвижными обмотками «Электричество» № 10—11 за 1939 г., стр. 106]], то за счет устранения регулировочных реостатов еще можно уменьшить и экономия энергии достигнет примерно 10%.

Необходимо, однако, помнить, что в начальный период формовки при таком низком напряжении ртутный выпрямитель может не принять нагрузку ввиду затрудненного зажигания дуги. В таком случае нужно формовку до нагрузки 150 А начать по обычной схеме при выпрямленном напряжении 100 В, а в некоторых случаях даже при 200 В.

Для облегчения горения дуги при фазовом напряжении 20,5 В в начальный период формовки был применен ртутный осциллятор, подключенный к катоду и одному из анодов. При этом было замечено свечение всей поверхности катодов после отключения возбуждения и свечения напряжения на анодах.

Если осциллятор включить при отключенном возбуждении, то свечение на катод не возникает.

При подключении осциллятора к одному из анодов (до того не горевшие) аноды принимали на себя нагрузку, но после отключения осциллятора дуга на анодах снова гасла. Таким образом было установлено, что осциллятор облегчает зажигание дуги на анодах, но не вполне эффективно, повидимому, вследствие недостаточности мощности осциллятора, однако проверить это обстоятельство не представлялось возможным.

Расчет контактных проводов на нагревание

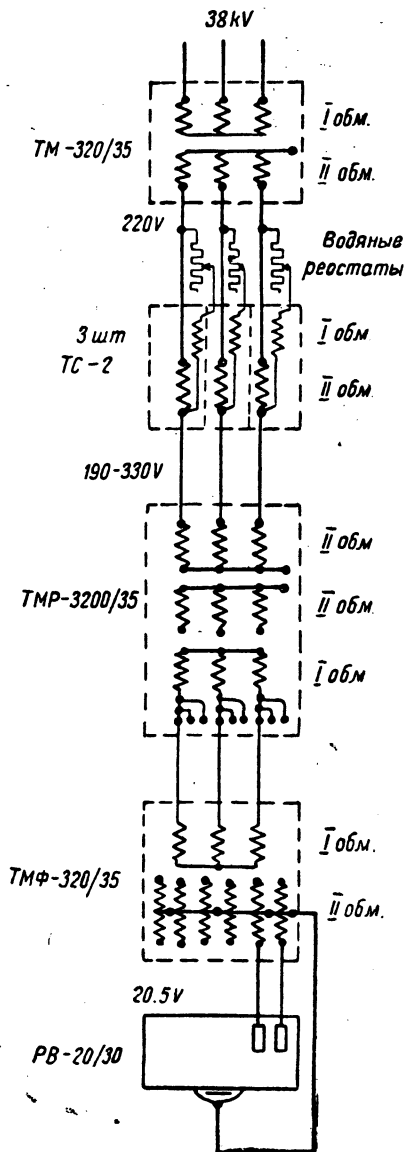
Л. Г. АБЕЛИШВИЛИ

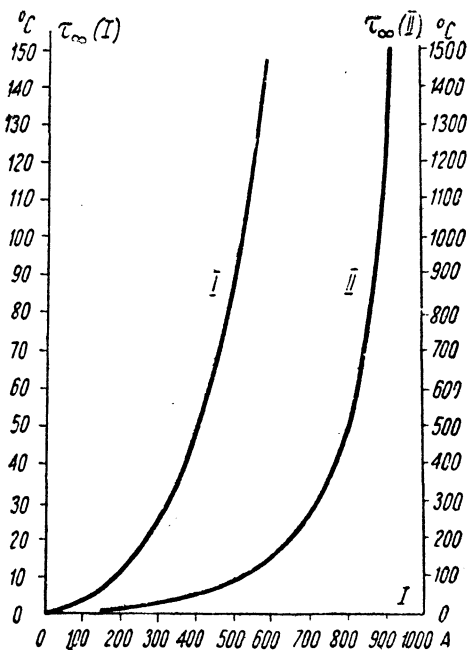
Отдел электрификации Закавказской железной дороги

Нагрев электрических, голых проводов на открытом воздухе обычно нормируется на длительно действующий ток. Нагрев при этом определяется наибольшей температурой 70—80°, не нарушающей нормальной работы контактов.

Условия работы контактных проводов электрических дорог по характеру нагрузок сильно отличаются

¹ См. «Правила безопасности и правила устройства электротехнических сооружений сильного тока низкого напряжения» с пояснениями, составленными Подольским. ОНТИ, § 102, 1937, примечание 5.





с.1. Установившееся превышение температуры над температурой окружающей среды для контактного провода 100 мм² в зависимости от тока

ловий работы обычных воздушных линий общего назначения. В контактных проводах преобладают кратковременные перегрузки и, как правило, длительные нагрузки отсутствуют.

Работа контактных проводов, в основном, определяется значением напряжения в сети, и нагревание их, обычно, имеет лишь проверочное значение. Нагревание контактных проводов может быть относительно значительным при коротких пролетах или нагрузках, сосредоточенных возле подстанции, т. е. при небольших сечениях контактной сети. В этих случаях проверка на нагрев, конечно, желательна. Проверка контактных проводов на нагревание должна основываться не на длительных нагрузках, а обязательно на учете изменений нагрузок как по величине, так и во времени, ибо даже кратковременное повышение температуры 90–100° может вызвать отжиг медного твердотянутого провода, а следовательно, повышенный износ контактной сети. Что касается среднеквадратичных токов, то, как увидим, техника расчета по точным формулам настолько проста, что расчет по среднеквадратичным токам теряет всякое значение.

Расчет проводов на нагревание при переменных как по величине, так и во времени нагрузках излагается довольно подробно в существующей литературе по электрическому соединению. Но при этом обычно пренебрегают увеличением сопротивления провода в результате нагревания его. Пренебрежение этим приводит к погрешности, вполне ощутимой в инженерной практике. Как известно³, в теории нагревательных двигателей введение температурного коэффициента привело к существенным поправкам в тепловых характеристиках. Таким образом существующие в общей теории электричества расчеты нагревания проводов с учетом температурного коэффициента могут быть исправлены в сторону повышения их точности. Наконец, расчеты по формулам, содержащим показательные функции, можно считать, если не идеальными, то, безусловно, позволяющими искать более точного решения.

В настоящей работе предлагается расчет контактных проводов на нагревание при переменных нагрузках, учитывающий температурный коэффициент. Предлагаемый расчет представляет собою приложение к контактным проводам известной и распространенной в электрической тяге теории нагревания тяговых двигателей.

Для одного погонного метра контактного провода можно

написать следующее уравнение теплового баланса:

$$(1 + \alpha\tau) R_0 I^2 = B\tau dt + c d\tau, \quad (1)$$

где: I — ток в А, τ — превышение температуры в °С контактного провода над температурой окружающей среды Θ_0 ($\tau = \Theta - \Theta_0$), R_0 — сопротивление метра провода в Ω при температуре $\Theta_0 = 30^\circ$, α — температурный коэффициент меди (равный для меди контактных проводов 0,00388), B — коэффициент, характеризующий охлаждение провода в $W/^\circ C$, t — время в мин, C — теплоемкость провода в $W \text{ min}/^\circ C$.

Если ввести обозначения

$$\tau_\infty = \frac{R_0 I^2}{B - \alpha R_0 I^2} [^\circ C] \quad (2)$$

и

$$T = \frac{e}{B - \alpha R_0 I^2} [\text{min}], \quad (3)$$

то уравнение можно представить в виде:

$$d\tau = (\tau_\infty - \tau) \frac{dt}{T}. \quad (4)$$

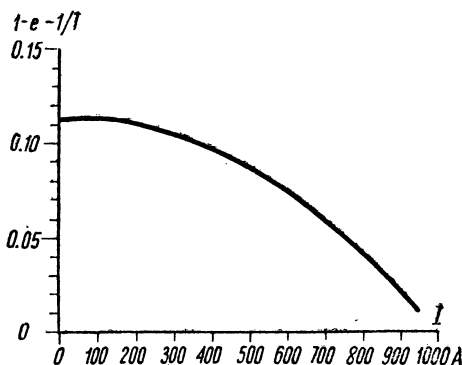


Рис. 2. $\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) = \varphi(I)$.

При интегрировании в пределах от t до $t + \Delta t$ и неизменном токе интеграл уравнения (4) будет:

$$\Delta\tau = (\tau_\infty - \tau) \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{T}}\right). \quad (5)$$

Равенство (5) и представляет собою расчетную формулу. Величины τ_∞ и T суть тепловые параметры контактного провода. τ_∞ — представляет собою установившееся превышение температуры провода при заданной силе тока, T — называется (неправильно) „постоянной“ времени охлаждения провода.

Ниже мы ограничиваемся лишь перегонным контактным проводом сечением 100 мм², так как меньшие сечения, подвешиваемые на станционных путях, работают параллельно и нагреваются менее интенсивно. Для определения зависимости τ_∞ и T от тока нужно предварительно определить B .

Коэффициент теплоотдачи B может быть определен, если известна установившаяся температура для какого-либо значения тока. Для этой цели можно использовать таблицу, приводимую Л. П. Подольским⁴.

Контактный провод — цельнотянутый и имеет меньшую поверхность охлаждения, чем многожильные провода, для которых составлена названная таблица. Поэтому мы принимаем для него при $q = 100 \text{ мм}^2$ меньшую нагрузку, а именно $I = 400 \text{ А}$ при $\tau = 50^\circ$. Эти значения дают $B = 3820 R_0$.

Подставив B в (2) и (3), найдем⁵ при $\alpha = 0,00388$

$$\tau_\infty = \frac{I^2}{3820 - 0,00388 I^2} \quad (6)$$

и

$$T = \frac{31350}{3820 - 0,00388 I^2}. \quad (7)$$

Равенства (6) и (7) определяют зависимости параметров τ_∞ и T от тока.

⁴ См. сноску 1.

⁵ Нами было принято: для контактного провода 100 мм², $\Theta_0 = 30^\circ$, $R = 1,86 \cdot 10^{-4} \Omega/\text{м}$, $C_0 = 5,83 \text{ W min}/^\circ C$.

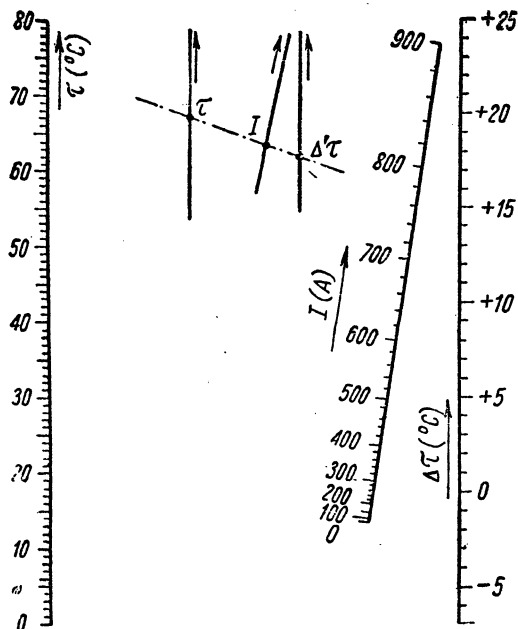


Рис. 3. Номограмма для определения превышения температуры контактного провода $q = 100 \text{ mm}^2$ над температурой окружающего воздуха при $\Delta t = 1 \text{ mm}$

Непосредственное пользование формулой (5) технически неудобно, так как определение показательных функций для каждого значения тока представляет некоторые трудности. Формула (5) может быть упрощена, если положить $\Delta t = 1 \text{ min}$.

Такое предположение практически вполне удобно: если токи определялись по выборкам из показаний регистрирующих приборов, то выборки для больших промежутков времени были бы не показательны, а для меньших промежутков просто затруднительны; если токи определялись расчетным путем, то в проектных заданиях обычно пользуются одномоментными или двухминутными промежутками.

После этого для дальнейшего упрощения формулы (5) можно ввести обозначения: согласно (6), $\tau_\infty = f(I)$, согласно (7),

$$\left[\left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \right) \right]_{\Delta t = 1} = \varphi(I).$$

При этих обозначениях расчетное уравнение (5) примет вид:

$$\Delta t = [f(I) - \tau] \varphi(I). \quad (8)$$

Пользование формулой (8) будет весьма просто, если функции $f(I)$ и $\varphi(I)$ заранее определить и представить в виде графиков, что и сделано на рис. 1 и 2.

Однако расчет может быть еще более упрощен, если формулу (8) изобразить в виде номограммы. На рис. 3 представлена створная номограмма, состоящая из двух параллельных и одной криволинейной шкал. По номограмме Δt непосредственно определяется по заданным τ и I . Расчет превышений температуры по номограмме рис. 3 сводится к чтению значений Δt и складыванию их на счетах.

Исследование трансформаторных масел, содержащих прибавки кумароновых смол¹

А. А. ВОРОБЬЕВ и Н. А. ПРИХОДЬКО
Сибирский физико-технический институт при Томском государственном университете им. Кудышова

В ряде исследований, проведенных в высоковольтной лаборатории СФТИ, было выяснено, что введение в масло доли процента кумароновых смол улучшает его свойства и повышает стойкость в эксплуатации сравнительно с исходным маслом.

¹ Постановлением от 3 июля 1939 г. бюро изобретений НКЭП авторам выдано авторское свидетельство.

Гигроскопичность масел с различным процентным содержанием кумароновой смолы в зависимости от времени хранения приведена на рис. 1. Кривые показывают, что при уменьшении процента содержания кумароновой смолы способность масла поглощать из воздуха влагу уменьшается. При содержании смолы 0,4% увеличение веса пробы масла после 16 суток хранения почти не наблюдается.

Данные рис. 1 характерны для большинства различных масел, подвергавшихся испытаниям.

Соответственно с изменением количества воды, поглощенной маслом, изменялось и его пробивное напряжение.

На рис. 2 представлено изменение пробивного напряжения в зависимости от времени открытого хранения масла. По ординат отложено значение пробивного напряжения при пробое на переменном напряжении, а по оси абсцисс — время в сутках. Электроды употреблялись стандартные с расстоянием между ними 2,5 мм. Кривая 3 соответствует исходному маслу, 2 — маслу, в котором кумароновая смола была введена тем изготовлением вначале концентрированного раствора смолы в масле и затем разбавления этого концентрированного раствора до нужной концентрации (до 0,5%). Кривая 1 указывает ту же зависимость для масла, в которое было введено 0,5% по весу мелкоизмельченной смолы, которая частично растворилась, а частично осталась лежать на дне сосуда нерастворенной.

Приведенные на рис. 2 данные показывают, что за 330 суток открытого хранения исходное масло за счет поглощения

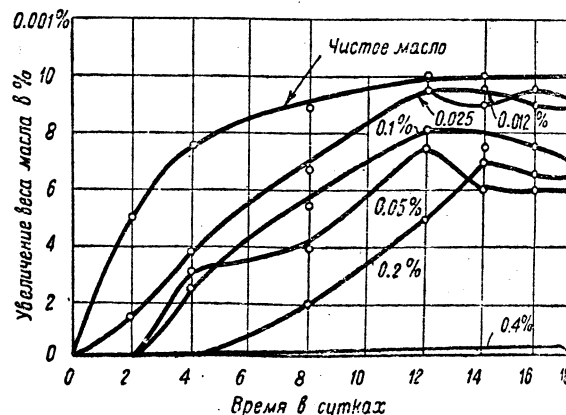


Рис. 1

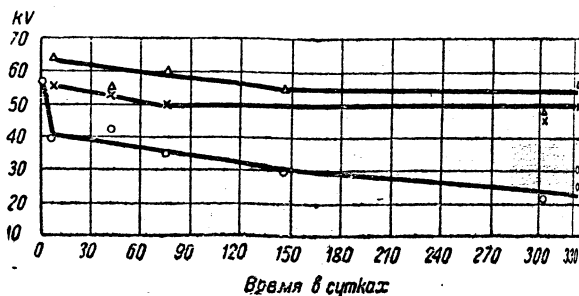
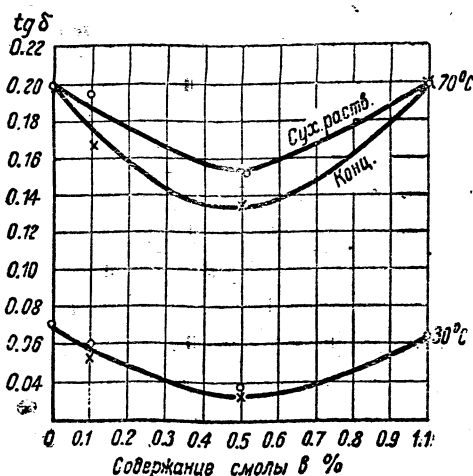


Рис. 2



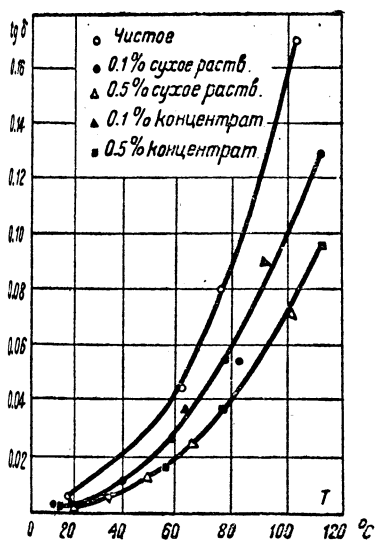


Рис. 4

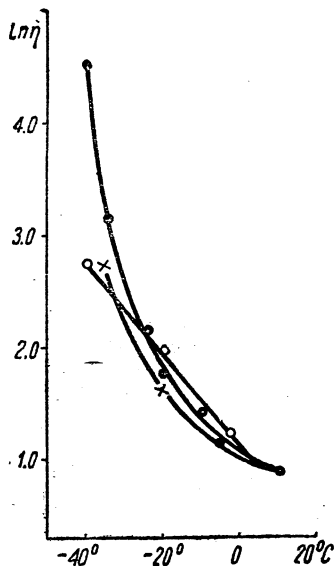


Рис. 5

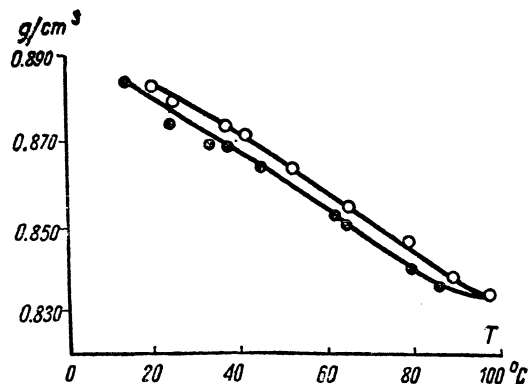


Рис. 6

лаги снизило пробивное напряжение на 64%, а масло, содержащее смолу, только на 10%.

Измерение диэлектрических потерь на мосте Шеринга показало, что некоторое процентное содержание смолы в масле приводит к понижению $\text{tg } \delta$ в 2 раза (рис. 3). Полученная зависимость показывает (рис. 3), что для данного масла существует некоторое оптимальное количество смолы, при котором потери получают наименьшие.

Интересно отметить, что наименьшей гигроскопичностью обладают масла с содержанием смолы около 0,3–0,5%.

На рис. 4 изображена зависимость $\text{tg } \delta$ от температуры. Из этого рисунка видно, что при введении в масло кумароновой смолы общий характер температурной зависимости $\text{tg } \delta$ сохраняется. Однако величина диэлектрических потерь уменьшается (на рис. 4 в 2 раза), что приводит к смещению рабочей температуры масла в область более высоких температур.

О качестве масла можно судить по величине его поверхностного натяжения. С увеличением поверхностного натяжения на границе масло — вода улучшаются диэлектрические свойства масел.

С целью изучения влияния кумароновых смол на свойства масел были проведены измерения поверхностного натяжения масел после введения присадок кумароновых смол, затем после пребывания масел в атмосфере повышенной влажности, наконец, после пребывания в атмосфере кислорода. Измерения показали, что поверхностное натяжение масел, содержащих кумароновую смолу, сохраняется неизменным, что время как поверхностное натяжение чистых исходных масел заметно ухудшается.

Измерения поверхностного напряжения проводились прибором Ребиндера, прибором Курлина и методом отрывания виска.

Кислотность масла при введении кумароновой смолы несколько уменьшается, что показывают данные, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Содержание кумароновой смолы в масле %	Кислотное число mg KOH	Содержание кумароновой смолы в масле %	Кислотное число mg KOH
0,000	0,30	0,051	0,25
0,034	0,27	0,2	0,24

Плотность масла, содержащего кумароновую смолу, определенная по методу ЦЭС, как это видно из табл. 2, не меняется.

Вязкость масел при введении кумароновой смолы увеличивается в сотых долях градусов Энглера (табл. 3). В низких температурах масла с содержанием кумароновой смолы вязкость масла.

На рис. 5 представлена зависимость логарифма вязкости от температуры. Кривая, идущая по черным кружочкам, дает зависимость логарифма вязкости от температуры исходного масла, застывшего в спокойном состоянии, кривая, построенная по крестикам, — для

Таблица 2

Содержание смолы %	Кислотность mg KOH		Осадок, %	Содержание смолы %	Кислотность mg KOH		Осадок, %
	до окисления	после окисления			до окисления	после окисления	
0	0,3	0,65	0,14	0	0,05	0,42	0,11
0,3	0,3	0,56	0,15	0,3	0,05	0,40	0,12

Таблица 3

Вязкость в $^{\circ}\text{Э}_{20}$			
исходное масло	масло с присадкой смолы 0,5%	исходное масло	масло с присадкой смолы 0,5%
5,47 5,72	5,50 5,76	6,22	6,28

масла, перемешанного перед измерением. Вследствие нарушения структуры вязкость масла после перемешивания значительно уменьшилась. Прямая (светлые кружочки) изображает ту же зависимость для масла, содержащего кумароновую смолу. Нужно заметить, что характер зависимости вязкости от температуры при введении кумароновой смолы изменился в благоприятную сторону и величина вязкости при низких температурах уменьшилась. Температура загустевания масла сдвинулась в область более низких температур.

Плотность масла, содержащего кумароновую смолу, в зависимости от температуры представлена на рис. 6. Измерение плотности велось весами Вестфала. Проба готовилась следующим образом: на дно сосуда насыпалась кумароновая смола и заливалась маслом, затем сосуд нагревался с помощью водяной бани. При повышении температуры смола растворялась.

Одна кривая на рис. 6 дает зависимость плотности масла от температуры при нагревании, другая кривая (кружочки) — то же при охлаждении. Ход кривых показывает, что растворявшаяся при повышении температуры смола при последующем понижении температуры не выпадает из раствора.

С целью изучения поведения масел с присадками кумароновых смол в условиях работы трансформаторов были проведены полугодовые наблюдения за трансформаторами, залитыми маслом с 0,3% смолы.

Два трансформатора типа ТМ, 3300/220 В, мощностью 75 кВА, и два трансформатора такого же типа, мощностью по 50 кВА, были выделены для этих целей Управлением сетей и подстанций Томской эл. Кроме этих трансформаторов, под наблюдением находилось еще два трансформатора нашей лаборатории напряжением 10 кВ мощностью 1,5 кВА. Три трансформатора из шести были залиты чистыми маслами, три — маслом с кумароновой смолой, введенной в масло

Магнито-электрический амперметр переменного тока

(Предварительное сообщение)

Л. А. ГОНЧАРСКИЙ
Ленинград

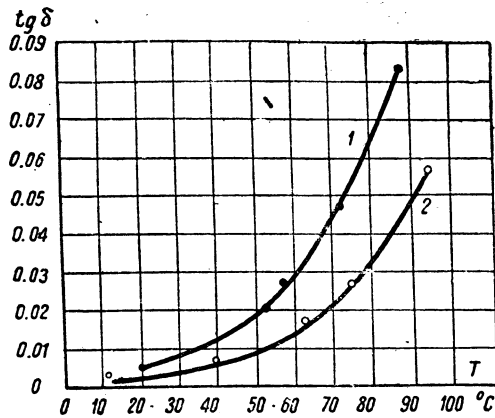


Рис. 7

или в виде концентрированного раствора в масле или в виде порошка. Наблюдения за этими аппаратами показали, что масла с кумароновыми смолами в условиях службы трансформатора более устойчивы, чем исходные масла: кислотность масел, содержащих смолу, с течением времени растет медленнее; пробивное напряжение меньше падает.

Другие характеристики этих масел также меньше изменяются со временем. На рис. 7 представлен температурный ход тангенса угла диэлектрических потерь для масел, взятых из двух спаренных трансформаторов после их годовой работы. Как видно, в обычном масле (кривая 1) потери в 2 раза больше, чем в масле, содержащем кумароновую смолу.

Данные наблюдений за изменением свойств масла в трансформаторах, находящихся в эксплуатации, позволяют говорить о положительном итоге испытаний масел, содержащих кумароновую смолу, в эксплуатационных условиях.

Кроме указанных выше наблюдений за изменением свойств масел с присадками кумароновых смол в условиях эксплуатации, проводятся систематические наблюдения за старением масел с присадками смол в условиях открытого хранения. Под наблюдением находятся три сорта масел, из которых приготовлены 15 проб с различным содержанием смолы, введенной различным образом. Результаты годовых наблюдений за этими пробами показали, что масла, содержащие смолу, старятся медленнее, чем исходные масла, находящиеся в тех же условиях открытого хранения.

Все вышеизложенные данные позволяют нам поставить вопрос о применении масел с присадками кумароновых смол для опытной эксплуатации в более широких масштабах, чем в наших опытах. Мы считаем возможным употреблять масла, содержащие кумароновые смолы, для заливки трансформаторов, конденсаторов, втулок и изготовления пропитываемого состава для кабелей.

Как показывает опыт, для каждого испытанного масла имеется своя оптимальная присадка смолы, величина которой легко подбирается при измерении угла потерь в зависимости от содержания процента смолы. Величина оптимальной присадки колеблется в пределах 0,2—0,5%.

В процессе работы были опробованы следующие способы введения смолы в масло: растворение смолы в масле при комнатной температуре и температуре 60—80°; изготовление концентрированного раствора смолы в масле (3—5%) и затем — разбавление концентрата в масле до нужного разведения; разгонка кумароновой смолы и введение в масло отдельных погонцов; растворение кумароновой смолы в растворителе (бензол, ксилол и др.), введение этого концентрата в масло и удаление растворителя. Наиболее простыми и дающими хорошие результаты являются способы 1, 2 и 3.

При большом содержании кумароновой смолы в масле (от 50 до 90%) получаются компаунды, которые обладают хорошими электроизолирующими свойствами. Например, пробивной градиент компаунда с содержанием смолы в масле в 90% достигает 10⁶ В/см. В горячем состоянии эти компаунды хорошо пропитывают пористые и волокнистые материалы — бумагу, дерево, ткань. Кабельная бумага, пропитанная компаундом, увеличивает свое пробивное напряжение в 10 раз. Компаунд с содержанием кумароновой смолы от 80% и выше при комнатной температуре является твердым. Конденсаторы, изготовленные с использованием этого компаунда, при толщине слоя диэлектрика в 4—5 мм работали в ударном контуре при рабочем напряжении 60 кВ. Емкость конденсатора достигала 1000 см.

Литература

1. А. А. Воробьев и Н. А. Приходько. Заявка на авторское свидетельство в НКЭП. 15690.
2. Ш. А. Приходько. Труды СФТИ в печати.

Направление отклонения катушки магнито-электрического прибора определяется направлением тока, текущим по обмотке рамки прибора. Поэтому магнито-электрические приборы применялись только для измерений постоянного тока. При пропускании переменного тока через прибор начинает вибрировать, что обычно обнаруживается по колебаниям стрелки прибора. Казалось бы, что периодически приложенная к рамке, меняющая свое направление с течением полярности питающего тока, лишает возможность применить магнито-электрический прибор для измерения переменного тока. Однако можно показать, что подобное заключение справедливо не для всех случаев. Если находится в неоднородном магнитном поле, например в форме полюсных наконечников, приведенной на рис. 1, кроме периодической силы, толкающей рамку в одну, то в обратную сторону, появляется постоянная сила, стремящаяся повернуть рамку. Величина этой силы тем больше, чем больше сила тока, протекающего при одном и том же значении тока амплитуды колебаний рамки.

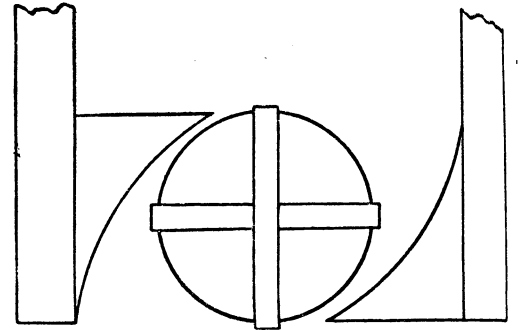


Рис. 1

Это явление можно, повидимому, характеризовать «детектирование механических колебаний при помощи магнитного поля».

При включении обычного магнито-электрического прибора с полюсными наконечниками, показанными на рис. 1, можно обнаружить, кроме вибрации стрелки, смещение в одну сторону.

Величина смещения определяется силой тока, текущим через рамку, поэтому магнито-электрический амперметр симметричным магнитным полем может быть использован для измерения переменного тока.

Однако значительный момент инерции рамки, стрелки и другие элементы, сильно понижают чувствительность прибора; с другой стороны, колебания стрелки не дают точный отчет показаний прибора.

Для увеличения чувствительности прибора следует создать наиболее благоприятные условия детектирования, а именно — особый род вибрационного фильтра, который задерживает колебания большой частоты и пропускает бы медленные колебания (модуляцию) их амплитуды. Таким фильтром может служить всякая упругая система с большим моментом инерции (большой временной постоянной), в частности, магнитная рамка без всякой обмотки.

Эта рамка несет стрелку и имеет отдельную пружину, обеспечивающую восстанавливающий момент. Рамку с пружиной (без стрелки) необходимо связать с фильтром (рамкой другой пружины, обеспечивающей ей возможность совершать частые колебания с достаточной амплитудой) и использовать наиболее удобным образом градиент неоднородности магнитного поля.

Для опытов был использован прибор типа МН «Электроприбор». Полюсные наконечники магнита были лены, как это показано на рисунке. Подвижную рамку прибора изготовили в виде двух рамок. Внутренняя (рамка того же прибора МН), несущая обмотку, вращается на керках, упирающихся в подпятники, укрепленные в внешней рамке, изготовленной из латуни, а внешняя в свою очередь вращалась на керках в подпятниках, укрепленных в каркасе прибора. Рамки расположили крестом (как это показано на рисунке) для того, чтобы увеличить ширины воздушного зазора. Внутренняя рамка с внешней была связана стальной спиральной пружиной.

нительно жесткой), а наружная рамка была связана с каркасом бронзовой спиральной пружины, применяемой в приборе МН. Стрелка прикреплялась к наружной рамке. Таким образом была получена система внутренней рамки малой массы и соответственно малого периода качания, создающей вращающий момент, и система наружной рамки, имеющей большой период качания и несущей стрелку. Направление изменения воздушного зазора было выбрано так, чтобы ширина воздушного зазора была наименьшей при нулевом положении рамки и возрастала с отклонением рамки. Испытание показало, что чувствительность прибора с двумя рамками к переменному току оказалась во много раз большей однорамочного прибора.

Не касаясь в настоящем сообщении условий, определяющих наибольшую чувствительность прибора, следует все же отметить целесообразность уменьшения собственного периода внутренней рамки и приближения ее собственной частоты к частоте измеряемого тока.

Шкала прибора оказалась нелинейной, причем линейному закону изменения воздушного зазора соответствовала приблизительно квадратичная шкала. Видимо, для увеличения равномерности шкалы следует изменить форму воздушного зазора, сделав нарастание ширины его в начале шкалы более интенсивным, чем в конце¹.

¹ Проф. Г. А. Гринберг и проф. Б. А. Остроумов дали автору ряд ценных указаний по изложенному вопросу.

К ПЕРЕСМОТРУ СТАНДАРТОВ И НОРМ

Замечания к проекту стандарта „Правила испытания силовых трансформаторов“¹

Испытание трансформатора на нагревание, согласно рассматриваемому проекту, производится при некоторой условной нагрузке, создающей в трансформаторе потери, равные потерям в нем при номинальной нагрузке и при температуре обмоток 75°. Так как при температуре окружающей среды порядка 5—10° и выше обмотки трансформатора при номинальной нагрузке имеют температуру больше 75°, то в этих случаях для получения заданных потерь испытание на нагревание приходится производить при нагрузках, пониженных по сравнению с номинальной. Наоборот, при температурах окружающей среды ниже 5—10° испытание на нагревание приходится производить при нагрузках выше номинальной. Поскольку выделяющиеся в трансформаторе во всех этих случаях потери одинаковы (а именно, равны потерям в нем, получающимся при номинальной нагрузке и температуре обмоток 75°), то составители проекта стандарта предполагают, что и превышения температуры обмоток над температурой окружающей среды будут во всех этих случаях одинаковы.

В действительности коэффициент рассеяния тепла для трансформаторов с естественным охлаждением зависит от температуры окружающего воздуха; поэтому превышения температуры, получаемые при том испытании, несмотря на одинаковую величину выделяющихся потерь, оказываются зависящими от температуры окружающего воздуха, а это, естественно, может вызвать недоразумения при приемке трансформатора.

Таким образом при методе испытания, предложенном в проекте стандарта, недостаточно создать трансформаторе при испытании определенные потери; надо еще условиться, при какой стандартной температуре окружающей среды следует производить испытание на нагревание, и в том случае, когда температура отличается от стандартной, вносить поправки, учитывающие влияние температуры окружающего воздуха на превышение температуры обмоток.

Вопрос о необходимости введения поправок был рассмотрен некоторыми членами рабочей комиссии при рассмотрении проекта стандарта, причем было

поручено составителям стандарта осветить этот вопрос в пояснительной записке к стандарту. Следует отметить, что по нормам других стран испытание трансформатора на нагревание должно производиться не при заданных потерях, соответствующих температуре обмоток 75°, а при номинальных значениях тока и напряжения. При таком испытании потери в трансформаторе растут при увеличении температуры воздуха, но это изменение потерь в трансформаторах с естественным охлаждением компенсируется изменением коэффициента рассеяния тепла. Вопрос об изменении потерь и коэффициента рассеяния тепла нашел отражение в американском стандарте на трансформаторы, в котором указано, что при испытании трансформаторов с естественным охлаждением превышение температуры обмоток практически не зависит от температуры воздуха при изменении этой температуры от 10 до 40° (испытание по американскому стандарту производится при номинальных значениях тока и напряжения).

Составители проекта стандарта, рассматривая трансформаторы с естественным охлаждением, пришли к другому выводу, указывая, что «целесообразнее все испытания основывать на определенном значении потерь, пренебрегая изменением теплоотдачи при изменении температуры окружающей среды». Согласиться с таким выводом, однако, никак нельзя, так как при обосновании его в пояснениях к проекту стандарта допущен ряд ошибок. Если эти ошибки исправить, то получается результат, обратный тому, который получили составители проекта стандарта. Укажем здесь эти ошибки.

1. Уравнение Лоренца (уравнение 1) в том виде, в каком оно приведено в пояснениях к стандарту, справедливо только для газов, у которых коэффициент объемного расширения

² равен $\alpha = \frac{1}{\theta_0}$ (см. Lorenz, Ann. Ph. Chem. 1881, Bd 13,

стр. 582, и Рихтер „Электрические машины“, т. I, стр. 315, уравнение 451 нем. изд.). У масла коэффициент α можно считать в пределах температур 20—80° постоянным [2, стр. 81, табл. 11], поэтому при определении τ_k — превышения темпе-

² Обозначения и нумерация источников, на которые делается ссылка, те же, что и в пояснениях к проекту стандарта. „Электричество“. № 2, 1940.

ратуры меди над температурой масла, следует вместо уравнения (1) применять уравнение

$$\Phi = 0,548 \sqrt{\frac{c g \alpha \lambda^3 \gamma^2}{\mu h}} (\theta - \theta_0)^5.$$

2. В пояснительной записке к проекту стандарта принято $c \gamma^2 \lambda^3 = \text{const.}$

Теплоемкость масла c , действительно, можно считать постоянной. Плотность масла γ , как следует из данных табл. 11, стр. 81 [2], изменяется с температурой незначительно. В среднем для разных сортов масла при температурах масла θ_m от 20 до 80° можно считать

$$\gamma = \gamma_{80} \left(1 + \frac{80 - \theta_m}{60} 0,046 \right),$$

где γ_{80} — плотность при температуре масла $\theta_m = 80^\circ$.

Данные о теплопроводности масла λ , заимствованные из книги А. В. Трамбичко „Расчет трансформаторов“ (стр. 202, рис. 149), приведены ниже в табл. 1, в которой вычислены также отношения $\gamma^2 \lambda^3$ при различных температурах масла θ_m при $\theta_m = 80^\circ$. Как видно из данных табл. 1, нельзя принять $c \gamma^2 \lambda^3$ постоянной величиной.

Таблица 1

Температура воздуха θ_0	35	25	15	0
Температура масла θ_m	80	70	60	45
Теплопроводность λ	2,05	2,00	1,91	$1,80 \times 10^{-3}$
Отношение γ/γ_{80}	1	1,008	1,016	1,027
„ μ/μ (по данным лаборат. им. Смурова)	0,070	0,082	0,100	0,165
$(\gamma^2 \lambda^3)/(\gamma_{80}^2 \lambda_{80}^3)$	1	0,946	0,836	0,714
Отношение $(\tau_k)_{\theta_0}/(\tau_k)_{85}$ при условии, что принято:				
1) μ по данным лаборат. Смурова	1	1,046	1,117	1,276
2) μ обр. проп. θ_m	1	1,039	1,099	1,200
3) μ по данным пояснений к проекту	1	1,013	1,048	1,098

3. Вязкость масла μ на основании данных Рихтера и опытов ВЭИ принята в пояснениях обратно пропорциональной температуре масла. Данные опытов, произведенных в лаборатории им. Смурова, не соответствуют этой зависимости [2, стр. 82, рис. 37].

Учитывая замечания, приведенные в пп. 1 и 2, мы произвели пересчет значений $\frac{(\tau_k)_{\theta_0}}{(\tau_k)_{85}}$, причем вследствие расхождения данных о вязкости масла было сделано два расчета: при первом было предположено, что вязкость обратно пропорциональна температуре, при втором — значения $\frac{\mu}{\gamma}$ были взяты по данным опытов в лаборатории им. Смурова [2, стр. 82, рис. 37, кривая 2]. Результаты подсчетов приведены в табл. 1, в которую для сравнения внесены отношения $\frac{(\tau_k)_{\theta_0}}{(\tau_k)_{85}}$, фигурирующие в пояснениях к проекту.

Соответственно изменениям в отношении $\frac{(\tau_k)_{\theta_0}}{(\tau_k)_{85}}$ изменяются значения коэффициента k_1 , учитывающего влияния температуры воздуха на коэффициент рассеяния тепла при постоянстве потерь (табл. 2).

При всех этих расчетах соотношение потерь и превышения температур меди и масла были приняты такими же, как и в пояснениях к проекту стандарта.

В табл. 2 внесены еще значения k_1 , приведенные в пояснении к проекту стандарта, и коэффициент k_2 , характеризую-

Табл. 1

	$O_u/O_k = 0,1$			$O_u/O_k =$	
а) Значения μ/γ взяты по данным лаборатории им. Смурова					
θ_0	0	15	25	0	15
$(\tau_{мер})_{\theta_0}/(\tau_{мер})_{85}$	1,008	1,002	1,000	1,03	1,014
$(\tau_k)_{\theta_0}/(\tau_k)_{85}$	1,26	1,117	1,046	1,276	1,117
k_1	1,094	1,040	1,015	1,113	1,048
k_2	0,93	0,96	0,98	0,93	0,96
$k_1 k_2$	1,016	0,998	0,995	1,035	1,006
k_1 по пояснению к стандарту	1,038	1,017	1,004	1,054	1,028

б) Значения μ приняты обратно пропорционально

θ_0	0	15	25	0	15
$(\tau_{мер})_{\theta_0}/(\tau_{мер})_{85}$	1,008	1,002	1,000	1,032	1,014
$(\tau_k)_{\theta_0}/(\tau_k)_{85}$	1,200	1,099	1,039	1,200	1,099
k_1	1,072	1,034	1,013	1,088	1,042
k_2	0,93	0,96	0,98	0,93	0,96
$k_1 k_2$	0,997	0,992	0,993	1,012	1,000
k_1 по пояснению к стандарту	1,038	1,017	1,004	1,054	1,028

щий изменение потерь при изменении температуры воздуха. Как видно из данных табл. 2, значения k_1 , фигурирующие в пояснениях к проекту стандарта, преуменьшены, и значение о том, что $1 - k_2$ в несколько раз больше k_1 неверно.

Интересно отметить, что произведение k_1, k_2 , характеризующее влияние изменения температуры воздуха на повышение температуры обмотки при учете изменения потерь коэффициента рассеяния тепла, сохраняется почти постоянным. Так, при изменении температуры воздуха от 15 до 0° это произведение отличается от единицы менее чем на 1%. Таким образом в результате анализа соотношения коэффициентов k_1 и k_2 (вычисленных с исправлением ошибок пушечных составителями проекта стандарта), приходим к следующим заключениям в отношении трансформатора с естественным масляным охлаждением:

а) Незначительное изменение произведения k_1, k_2 не влияет на правильность рекомендации американского стандарта о независимости превышения температуры обмотки от температуры окружающего воздуха, если испытание на нагревание производится при номинальных значениях тока и напряжения.

б) Сравнительная близость величин $k_1 - 1$ и $1 - k_2$ вызывает на неправильность вывода, приведенного в пояснении к проекту стандарта, о возможности пренебречь изменением коэффициента рассеяния тепла.

Вследствие этого, если испытание трансформатора на нагревание производится при потерях, соответствующих температуре обмоток 75°, необходимо вводить поправки к значениям при испытании значения превышения температуры обмоток и масла для учета влияния изменения коэффициента рассеяния тепла.

В связи с необходимостью вводить указанную поправку возникает вопрос, к какой температуре окружающей среды приводить получаемые при испытании значения превышения температуры. Поскольку в проекте стандарта предлагается испытание при потерях, соответствующих температуре обмоток 75°, то мы считаем единственно правильным вводить превышения температуры обмоток к той температуре окружающей среды, при которой в условиях номинальной нагрузки обмотки имеют температуру 75°. Если вводить поправку, то полученное таким образом превышение

температуры, как следует из изложенного выше, окажется в значительной степени превышением температуры, получаемому при испытании трансформатора на нагревание в условиях, предусмотренных нормами IX ВЭС, а именно, при номинальных значениях тока и напряжения.

Следует отметить, что предписания стандарта на силовые масляные трансформаторы (ОСТ 2524, § 26), касающиеся допустимых превышений температур, а также предписания рассматриваемого нами проекта стандарта, касающиеся испытания на нагревание, не давая указаний, к какой температуре окружающего воздуха следует относить превышения температур, в неявной форме преуменьшают истинные превышения температур и в то же время могут повести к отменным выше недоразумениям.

По этим причинам мы полагаем, что способ испытания трансформаторов на нагревание, принятый в нормах других стран, а также указанный в правилах и нормах для испытания трансформаторов, одобренных IX ВЭС, а именно, испытание при номинальных значениях тока и напряжения является более целесообразным и ему следует отдать предпочтение.

Приведенные выше рассуждения относились к трансформаторам с естественным охлаждением. Необходимо дополнить

стандарт также указаниями о влиянии температуры воздуха и воды на превышения температуры трансформаторов с искусственным охлаждением.

Касаясь прочих разделов проекта стандарта, следует отметить, что указание § 63 о необходимости измерения сопротивления изоляции само по себе недостаточно; необходимо дать указания о требуемой величине сопротивления изоляции, так как в противном случае такое измерение не имеет смысла.

Кроме того, следует ввести в состав контрольных испытаний испытания бака (§§ 53 и 56 проекта стандарта).

А. В. ТРАМБИЦКИЙ
Ленинградский завод „Электрик“

С. М. ГОХБЕРГ
Ленинградский институт инженеров связи

З. П. ЧЕРНОГУБОВСКИЙ
„Ленгидэп“

В. И. ИВАНОВ
„Ленгидэп“

Г. П. АЛЕКСАНДРОВ
Ленинградский индустриальный институт

БИБЛИОГРАФИЯ

БЫЧКОВ В. Электротехника в военно-инженерном деле. М. 1939, 328 стр., 239 рис. (Военно-инженерная академия им. Куйбышева), 1500 экз., цена 21 р. 35 к.*

Несмотря на довольно широкое и многообразное применение электрической энергии в военно-инженерном деле, до сих пор в специальной военно-технической и учебной литературе было работы, в которой были бы собраны все основные сведения по этому вопросу.

Настоящая работа В. Быčkova дает возможность как слушателям, изучающему военно-инженерное дело, так и военному инженеру, находящемуся уже на практической работе, ознакомиться в одной книге с основами применения электричества в военно-инженерном деле.

В первой главе «Применение электродвигателей для привода» автор излагает главным образом вопросы, связанные с эксплуатацией электродвигателей применительно к возможным случаям их использования для механизации (приведение в действие машин — орудий и исполнительных механизмов) и сокращения военно-инженерных и военно-строительных работ. Учитывая, что производство военно-инженерных работ происходит и ночью или в особых условиях без естественного освещения, вопрос об устройстве электроосветительных устройств и рациональной организации освещения, в том же и боевого прожекторного освещения, автор выделил отдельную вторую главу.

В третьей — «Использование электрической энергии для нужд надобностей военно-инженерного дела» — состоит из нескольких подразделов.

«Электрическое отопление».

«Электропрогрев бетона» — вопрос, особенно важный при производстве бетонных работ в зимнее время.

«Электросигнализация». Здесь автор ограничивается описанием наиболее распространенных схем электросигнализации, применяемых для лучшей организации и ускорения производства работ при большой разбросанности строительных работ.

«Применение электроэнергии для транспорта». Электрический транспорт представлен только кратким описанием устройства и эксплуатации электрокаров, изготовляемых промышленностью.

«Электризованные искусственные препятствия». Ввиду того, что этот вопрос является совершенно специфическим, изложен предваряется параграфом «Физиологические действия электрического тока на человеческий организм». При изложении этого вопроса автор учел опыт мировой империалистической войны и последних войн.

Материалы информационно-библиографического сектора научной библиотеки.

В четвертой главе — «Электрические сети» — рассматриваются техника и организация передачи энергии в пункты потребления.

Не рассматривая вопросов проектирования электрических станций, считая это делом специалиста-электрика, автор в пятой главе рассматривает лишь общие вопросы устройства и организации эксплуатации электрических станций и подстанций.

В главе шестой — «Защита от вредных проявлений электрической энергии» — рассматривается чрезвычайно важный вопрос об обеспечении защиты строительных сооружений и оборудования от грозных разрядов.

Таким образом содержание книги составляет изложение первоначальных основных сведений по производству, передаче и использованию электрической энергии в военно-инженерном и строительном деле. При этом особенное внимание обращается на выбор и технико-экономическое обоснование тех способов и приемов, которые наилучшим образом соответствуют различным конкретным условиям.

Изложено учебное пособие методически правильно и продуманно. В начале каждой главы имеется параграф «Общие сведения», в котором даются теоретические основы вопроса, рассматриваемого в данной главе, а в начале главы «Электрическое освещение» изложен даже краткий курс светотехники. Материал изложен с предельной простотой и четкостью, однако таким образом, что популярность изложения не идет в ущерб глубине и строгости изложения.

Обилие технических примеров и схем делает это учебное пособие особенно полезным при учебном курсовом и дипломном проектировании.

Наряду с указанными достоинствами книги следует отметить, что объем ее мог быть значительно сокращен, если бы автор не повторял изложение многих технических вопросов, которые с большой подробностью освещены в общих курсах электротехники.

Совершенно недостаточно освещены вопросы электрификации уже готовых инженерных сооружений. Также недостаточно приведено сведений по применению автоматики в управлении рабочими процессами. Так, за исключением двух типов электромагнитных реле — токового реле и реле времени — устройство релейных защитных систем и их применение в военно-инженерном деле не освещены. Не рассмотрен вопрос о трансформаторах с точки зрения специфики применения их в подвижных и временных станциях и подстанциях.

В основном же автор свою задачу создания учебного пособия по курсу военно-прикладной электротехники для слушателей военно-инженерной академии им. Куйбышева разрешил вполне успешно. Большая работа, затраченная на составление этого нового учебного пособия, приблизила ее по содержанию и изложению к тем требованиям, которые предъявляются к учебнику.

Книга эта явится ценным пособием не только для телей академии, но и для военно-практических ков.

Н. Го.
Военная академия

НОВЫЕ КНИГИ

Айзенберг Б. Л. Улучшение коэффициента мощности промышленных предприятий помощью статических конденсаторов высокого напряжения. Конспект лекций, читанных в институте в 1939/40 уч. году по циклу «Экономия электроэнергии и рационализации электрохозяйства». Л., Ин-т усовершенствования по энергетике, автоматике и связи, 1940, 36 стр. со схем., беспл.

Акулов Н. С. Ферромагнетизм. М.—Л., Гостехтеоретиздат, 1939, 188 стр. с чертеж. и граф., цена 5 р. 25 к., перепл. 1 р. 50 к.

Алаторцев С. А., Максимов А. Е. и Покровский Г. И. Горная электротехника. Под ред. Ф. Н. Шклярского. Утв. ВКВШ при СНК СССР в качестве учебн. пособия для горных втузов. Л.—М., Гостоптехиздат, 1939, 544 стр. с иллюстр. и черт., цена 16 р. 25 к., перепл. 1 р. 75 к.

Бабат Г. И. и Лозинский М. Г. Поверхностное упрочнение стали обработкой токами высокой частоты. М., Наркомсредмаш СССР. Центр. дом техники, 1940, 48 стр. с иллюстр. и чертеж., цена 2 руб.

Батуралин Н. И. Эксплуатация загородных сетей низкого напряжения. Консультант А. Н. Соколов. М.—Л., Госэнергоиздат, 1940, 52 стр. с иллюстр. и черт., цена 1 р. 15 к.

Бердичевский Б. Е. Параллельная работа самолетных генераторов постоянного тока. М., 1940, 92 стр. с иллюстр., чертеж., граф. и схем. (Труды Центр. Аэро-гидродинамич. ин-та им. проф. Н. Е. Жуковского, вып. № 483), цена 4 р. 50 к.

Васильев И. В. Аварии и неполадки электрических машин и мероприятия по борьбе с ними. М.—Л., Госэнергоиздат, 1940, 44 стр. с чертеж. и схем., цена 85 коп.

Викулов Н. Ф. Расчет и устройство защитных заземлений и занулений в установках потребителей электрической энергии. Конспект лекций, читанных в институте в 1939/40 уч. году по циклу «Экономия электроэнергии и рациональное ведение электрохозяйства». Л., Ин-т усовершенствования по энергетике, автоматике и связи, 1940, 76 стр. с чертеж., беспл.

Вологдин В. Поверхностная индукционная закалка. Метод лабораторий им. В. П. Вологодина. Л.—М., Оборонгиз, 1940, 72 стр. с иллюстр. и чертеж. [Ленинградск. электротехнич. ин-т им. В. И. Ульянова (Ленина)], беспл.

Гаврилов Д. А. Передвижные электростанции. М., Госкиноиздат, 1940, 92 стр. с иллюстр. и чертеж., цена 2 р. 50 к.

Горшков П. Н. Основы техники кабелей силового тока. Утверждено ВКВШ при СНК СССР в качестве учебника для электротехнических втузов. Л.—М., Госэнергоиздат, 1940, 303 стр. с иллюстр. и чертеж., цена 7 руб., перепл. 2 руб.

Геревич Л. Э. Электродинамика. Ч. 1. Микроскопическая электродинамика. Л., Ленинградск. гос. университет, 1940, 258 стр. с чертеж., цена 11 руб.

Золотарев Т. Л. Гидроэлектроцентраль в электроэнергетической системе (Энергетич. и техн.-эконом. расчеты). Под ред. В. Вейц. М.—Л., Изд-во Академии наук СССР, 1939, 200 стр., с чертеж. и граф. (Энергетический ин-т им. акад. Г. М. Кржижановского), цена 17 р. 50 к.

Изучение молнии, искрового разряда и защитного действия молниеотводов. (Сб. статей.

Ред. А. Д. Смирнов.) М.—Л., Госэнергоиздат, 1940, с иллюстр. и чертеж. (Труды Всес. электротехн. ин-та Отраслев. бюро тех. информации Главэлектропрома цена 3 р. 25 к.).

Исследования в области электрических измерений. (Сборник статей.) Под ред. Н. А. на. Л., Всес. научно-исслед. ин-т метрологии, 1939, с иллюстр. и чертежами. [Труды ВНИИМ, вып. 2 цена 4 р. 50 к.

Калантаров П. Л. и Нейман Л. Р. Теоретические основы электротехники. Утв. ВКВШ при СНК в качестве учебника для энергетич. и электротехнич. и фак-тов. Ч. 1, П. Л. Калантаров «Теория переменных». Изд. 2, 412 стр. с чертеж., граф. и схем., цена 8 руб., перепл. 1 р. 75 к.

Кондрашов А. А. и Матвеев М. И. Монтаж и эксплуатация оборудования распределительных устройств. Консультант-редактор Н. П. М.—Л., Госэнергоиздат, 1940, 43 стр. с граф. и схем. 1 руб.

Кунцевич Б. А., Разумов Б. А. и Ривлин Л. Б. Фабрично-заводские электросиловые установки ГУУЗ Наркомэлектро в качестве учебника для курсов соц. труда. Л.—М., Госэнергоиздат, 1940, 70 стр. с иллюстр., чертеж., граф. и схем., цена 15 руб., перепл. 2 руб.

Кутыловский М. П. и Сургучев В. Д. Электрическая тяга на городских железных дорогах. Испр. и дополн. М.—Л., Изд-во Наркомхоза РСФСР, 400 стр. с иллюстр. и чертеж., цена 8 р. 10 к. Международные нормы и правила по энергетике. (Международная электротехническая комиссия.) Под общ. ред. А. В. В. и М. А. Шателена. Л., Ком-т по участию СССР в международных энергетич. объединениях. 1940.

Вып. XVIII. Электродвижение судов. (П. норм.) Пер. под ред. В. И. Полонского. 20 стр. Беспл. Обмотки электрических машин. Сост. Еремеев, В. И. Зимин, М. Я. Каплан и др. Изд. 2, в. Утв. ГУУЗ Наркомэлектро в качестве учебника для мастеров соц. труда. М.—Л., Госэнергоиздат, 1940, 40 стр. с иллюстр., чертеж., граф. и схем., цена 12 р. 75 к.

Стекольников И. С. Молния. М.—Л., изд-во Академии наук СССР, 1940, 328 стр. с иллюстр. и граф. (Энергетич. ин-т им. Г. М. Кржижановского), цена 18 руб.

Тартаковский П. С. Внутренний фотоэффект в диэлектриках. М.—Л., Гостехиздат, 1940, 20 стр. с чертеж. и график., цена 7 руб.

Эксплуатация силовых трансформаторов (Сост. Оргрэн) М.—Л., Госэнергоиздат, 1940, 160 стр. с иллюстр. и чертеж. (Нар. Ком. электростанций и за-пром. СССР. Тех. совет. Типовые инструкции по эксплуатации энергетич. систем), цена 2 р. 20 к., перепл. 60 коп.

Электрические машины. Учебник для энергетических техникумов. Сост. И. И. Брейль, Л. Н. Г. Г. Б. Меркин и др. Под ред. Л. М. Пиотровского. Л., Госэнергоиздат, 1939, 450 стр. с чертеж. и граф., цена 7 руб., перепл. 1 р. 50 к.

Электроматериаловедение. Общая ред. Тареева. (Сост. В. А. Баев, Н. Г. Дроздов, И. И. нов и др.) (Для мастеров соц. труда.) М.—Л., Госэнергоиздат, 1940, 284 стр. с иллюстр., чертеж., граф. и схем. на 6 р. 60 к., перепл. 2 руб.

Электроматериаловедение. Сост. коллективом работников Моск. энергетич. ин-та им. В. М. Молотова. Общ. ред. Е. Ф. Камаркова. Изд. 5, перераб. и дополн. минимум.) М.—Л., Госэнергоиздат, 1939, 164 стр. с иллюстр. и чертеж., цена 2 р. 75 к., перепл. 75 коп.

Новая система освещения ПВО. *Metro-Vickers Gazette*. № 322, февраль, 1940.

В годовом отчете фирмы Метро-Виккерс за 1939 г. много внимания уделено новому методу освещения, при котором не требуется выключать освещение во время воздушной тревоги. Эта система, получившая название «Taffoblak», состоит из замены обычных осветительных устройств натриевыми лампами в баллонах из окрашенного стекла и покрытия всего остекления (окна, стеклянные двери и крыши) особым синим лаком, который хорошо пропускает дневной свет, но полностью поглощает желтый свет натриевых ламп. В журнале описано применение этой системы для освещения автобусов и промышленных складов. Указывается, что удалось подобрать теплостойкий желтый лак для ламп накаливания, что позволяет применять последние наряду с натриевыми.

А. И. Фройман

Монтаж опытно-показательной подстанции ПВО в Англии. *Electrician* № 3232, *El. Review* № 3259, 1940.

Центральное электроуправление оборудовало недалеко от Лондона опытно-показательную трансформаторную подстанцию типа ПВО. Она представляет интерес как по способам сооружения, так и по типу оборудования. Работы при сооружении подстанции велись в условиях противозвушной обороны за исключением ночного перерыва. Все комплектное оборудование подстанции было заказано и погружено в 7 h 30 min утра со склада резервного оборудования ПВО, который отстоит от площадки подстанции на расстоянии 12 km. На следующий день в 6 h 30 min вечера подстанция была готова к пуску. Монтажные работы продолжались 19 h. Ключевые элементы подстанции были заранее размечены, что упростило сборку.

При проектировке подстанции была учтена особенность Лондона — теснота и необходимость экономии места при размещении отдельных агрегатов подстанции. От воздушной высоковольтной линии 33 kV проведено отключение к временной деревянной опоре. Оттуда провода идут к бушингам понижающего трансформатора 20 MVA и 11/6,6 k. Трансформатор принадлежит к мощным типам ПВО и имеет минимальные габариты для удобства перевозки железной дороге и на грузовиках. Это достигнуто отказом от обычных отдельных масляных охладителей. Двойные вентилаторы, масляные насосы для принудительной циркуляции трансформатор в 30 kVA и 400/230 V для собственных нужд подстанции размещены на основном трансформаторе. Работа по присоединению кабелей производилась одновременно с работой по установке остальных элементов подстанции. Для холодной спайки кабельных концов была взята фирма Dunslath, которая сокращает эту операцию до 15 часов.

М. М. Финкель-Моисеев

Электрификация США в 1939 г. По материалам *Electrical* № 14, 1940; *om* 13/1; *Combustion*, янв. 1940; *Elektrizitätswirtschaft* № 10, 1940.

Электрификация США в 1939 г. развивалась в основном знаком военного фактора, «затушевывающего» влияние на хозяйство экономического кризиса¹. Важный фактор, в частности, обусловил подъем кривой выработки электроэнергии после значительного снижения ее в 1938 г. (табл. 1).

В результате сильной засухи гидростанции произвели на 10% меньше, чем в 1938 г.; поэтому покрытие пиковой нагрузки легло в основном на тепловые станции, выработка которых возросла на 21,5% (рис. 1). В целом, по тепловым и гидравлическим станциям годовая выработка в 1939 г. составила 12%.

Установленная мощность станций за истекший год возросла на 4 млн. kW и составила к началу 1940 г. 37,47 млн. kW (табл. 2 и рис. 2).

Работу В. И. Вейц, Некоторые особенности новейшего развития электроэнергетики в капиталистических странах. *Электротехника* № 8, 1939.

Таблица 1

Производство электроэнергии на электростанциях общего пользования США (в млрд. kWh)

Годы	Всего	В том числе:	
		тепловые станции	гидростанции
1937	115,2	74,2	41,0
1938	109,7	68,8	40,9
1939	123,0	83,6	39,4

Таблица 2

Динамика роста установленной мощности электростанций общего пользования США (в млн. kW на конец года)

Годы	Всего	В том числе:	
		тепловые станции	гидростанции
1937	34,96	25,33	9,63
1938	36,33	26,67	9,66
1939	37,47	27,54	9,93

Подавляющая часть новой мощности (78% по тепловым станциям и такой же процент по гидростанциям), как и в предыдущие годы, введена в порядке расширения действующих установок.

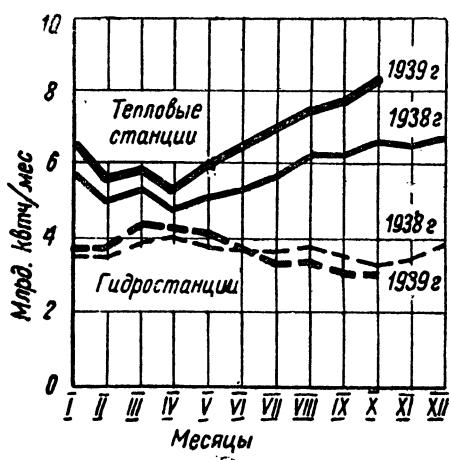


Рис. 1. Динамика месячной выработки электрической энергии на станциях общего пользования США

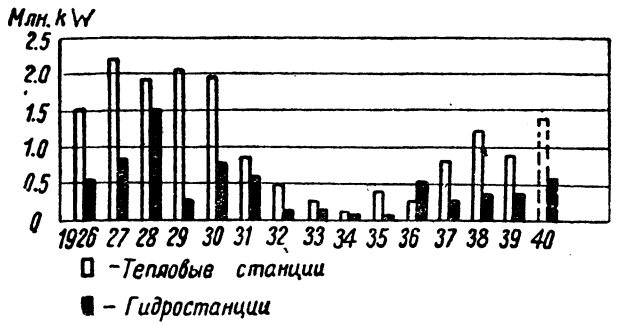


Рис. 2. Ввод новых мощностей на электрических станциях общего пользования США

Наиболее крупное расширение получила гидростанция Боулдер-Дам (165 MW), мощность которой в настоящее время доведена до 700 MW.

В 1940 г. намечается к вводу всего около 2 млн. kW, в том числе 1,4 млн. на тепловых станциях и 0,6 млн. kW на гидравлических. Отдельные электросистемы предполагают значительно увеличить мощность тепловых станций, так на-

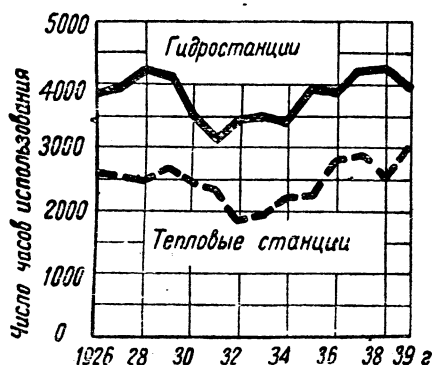


Рис. 3. Использование установленной мощности электрических станций общего пользования в США

пример, Коммонуэल्с Эдисоновская компания рассчитывает ввести 105 MW, Пасифик Гэз энд Электрик, Паблик Сэрвис оф Нью-Джерси — по 100 MW.

Наряду с ростом генерирующей мощности в 1939 г. отмечалось дальнейшее развитие сетевого хозяйства. Протяженность новых линий электропередачи составляла:

В 1936 г.	2 940 км
1937	8 200 .
1938	8 240 .
1939	8 600 .
1940	10 580 .
(план)	

Общая длина сетей напряжением от 30 kV и выше возросла от 192 000 км в 1929 г. до 234 000 км в 1938 г.

В течение последних лет особенно значительно расширены распределительные сети в сельских местностях. За период с 1935 по 1939 г. только за счет финансирования администрацией по сельской электрификации (REA) было построено 290 000 км сельских сетей, охвативших 400 000 абонентов.

В связи с военными задачами в истекшем году был выдвинут вопрос о создании высоковольтного кюста в наиболее важных промышленных районах страны (в северо-восточных и северо-центральных штатах).

Капиталовложения в электростроительство (централизованный сектор, не включая правительственные объекты) в 1939 г. составили 430 млн. долл. против 482 млн. долл. в предыдущем году.

В текущем (1940) году предполагается вложить в строительство 600 млн. долл., повысив, главным образом, долю вложений в тепловые станции (табл. 3). Однако, уровень капиталовложений остается все же значительно ниже 1930 г.

Таблица 3

Капиталовложения в электростроительство США (в млн. долл.)

	1930	1937	1938	1939	1940 (план)
Тепловые станции	176,5	94,9	133,0	101,5	231,3
Гидростанции	117,6	13,0	17,6	17,9	14,8
Линии передачи	139,5	80,0	36,0	45,5	67,5
Подстанции	123,5	40,7	46,4	31,8	39,3
Распределительные сети .	258,7	203,2	215,0	210,5	220,5
Разные	103,6	34,0	34,0	22,8	31,6
Всего	919,4	455,5	482,0	430,0	605,0

Военный фактор наложил свой отпечаток и на структуру расходной части электробаланса США (табл. 4).

В связи с ростом военных отраслей потребление электроэнергии в промышленности увеличилось на 19% против 1938 г., между тем как бытовое потребление, которое даже в кризисный 1937 г. дало годовой прирост в 10%, в 1939 г. выросло лишь на 7%.

Потребление электроэнергии по отраслям народного хозяйства США

(Централизованное электроснабжение)

Отрасли	1937 млрд. kWh	1938 млрд. kWh	1939 млрд. kWh
Промышленность			
Торговые предприятия и мелкомоторная нагрузка	53,5	44,9	53,1
Коммунальное хозяйство (освещение улиц и пр.)	17,6	18,3	19,9
Быт	3,4	4,3	4,8
Сельское хозяйство	16,9	18,5	19,3
Электрифициров. ж. д.	2,4	2,5	3,3
Пригородные ж. д. и трамвай .	1,3	1,4	1,9
	4,4	4,0	3,9
Всего	99,5	93,9	107,0

Развитие сетей и рост охвата электроснабжением местностей обусловили значительное повышение спроса на электроэнергию со стороны этой категории потребителей (до 32%). Однако доля последней в суммарном балансе невысока (3,1%).

Средний коэффициент использования мощности по общему пользованию возрос от 3065 h в 1938 г. до 3940 h в 1939 г. Улучшение этого показателя шло только за счет тепловых станций (3040 h в 1939 г. против 2500 h в 1938 г.). По гидростанциям, в силу отмеченных причин, коэффициент использования понизился от 4000 h в 1938 г. до 3940 h (рис. 3).

Произведенная в последние годы значительная реконструкция электростанций на базе высоких параметров пара сыграла существенную роль в дальнейшем снижении среднего удельного расхода топлива, доведенного в 1939 г. до 0,621 kg/kWh против 0,639 kg/kWh в 1938 г. и 0,648 kg/kWh в 1937 г.

В. И. Мухоморов

G. Bertling. Водные силы Швеции и их использование. *Wasserkraft & Wasserwirtschaft, 15 марта 1940.*

Территория Швеции на 8,5% занята поверхностью рек, площадь которых составляет 37 900 км². Потенциальная водная сила, по произведенным подсчетам, составляет 42 625 000 MWh в год, из которых 76,6% приходится на территорию Швеции. Промышленные водные энергетические ресурсы страны оцениваются в 32 500 000 MWh в год, что составляет 76% от всех потенциальных водных сил. 5000 h годового использования вся промышленная мощность водных ресурсов Швеции составляет 6500 MW, за исключением Норвегии (12 100 MW) и Франции (7900 MW). За последние 10 лет общее годовое электропотребление Швеции составило 4000 MWh, из которых промышленное электропотребление составляло около 80%, коммунальное — около 13%, а электрификация транспорта — около 7%. Мощность электростанций Швеции составляет около 1500 MW при среднем годовом потреблении 4250 h в год, из которых 1200 MW — мощность гидроэлектростанций. В электробалансе Швеции главную роль играет гидроэнергия. Наиболее низкой себестоимостью характеризуется энергия, вырабатываемая мощными государственными ГЭС, обслуживающими преимущественно тяжелую промышленность. Стоимость установленного kW в зависимости от мощности для 651 ГЭС, обследованных в Швеции и составляющих 65% суммарной мощности ГЭС страны, характеризуется следующими средними цифрами: ниже 50 л. с. — 969 kron/kW, от 1000 л. с. до 5000 л. с. — 576 kron/kW, выше 10 000 л. с. — 379 kron/kW.

Средняя стоимость установленного kW для обследованных ГЭС составляет 475 kron/kW. Тепловые электростанции в Швеции используются только в тех сравнительно редких случаях, когда река не допускает достаточного регулирования выработки энергии сооруженными на ней гидростанциями.

Н. А. Карацук

Единственным источником электрификации Марокко вследствие отсутствия угля являются водно-энергетические ресурсы. Строительство гЭС во французском Марокко началось в 1924 г., когда было приступлено к промышленной добыче полезных ископаемых (молибден, фосфориты, нефть, железо) и начата электрификация железных дорог. В это время годовое электроснабжение возросло с 11 000 MWh в 1925 г. до 128 000 MWh в 1938 г., при 78% доли гидроэнергии в электробалансе.

Основные показатели наиболее мощных ГЭС следующие:

Наименование ГЭС	Год пуска ГЭС	Напор м	Число и мощность гидрогенераторов MVA	Мощность ГЭС, MW	Выработка электроэнергии в 1938 г.
Сиди-Машу...	1929	19	4 × 5,2	20,8	45,411
Масба-Зидания	1936	37	2 × 4,45	7,0	37,621
Фэ (нижняя) ..	1934	52	2 × 1,18	2,0	10,941

Кроме того, имеется 4 малых ГЭС с суммарной выработкой энергии 14 000 MWh. Для всех ГЭС напряжение генераторов принято равным 5,5 kV и частота 50 Hz. ГЭС Фэ полностью автоматизирована. Объединение ГЭС в систему осуществляется при напряжении 60 kV. Вследствие крайней неравномерности режима большинства рек, стекающих с гор Атласа, все малые ГЭС, не располагающие достаточным регулированием, имеют резервные дизель-электрические установки. Кроме того, Рош-Нуар сооружена тепловая электростанция мощностью 3 MVA, выполняющая функции резерва системы. Схемы ГЭС Марокко предусматривают одновременное решение задач энергетики и ирригации, которая здесь широко известна.

Н. А. Караулов

I. Housley. Защита гидрогенераторов от конденсации влаги. El. World № 14, 1940.

В течение длительных остановок части агрегатов ГЭС во время маловодных сезонов года, обмотки гидрогенераторов могут быть легко повреждены конденсирующейся влагой, температура частей машины окажется ниже точки росы. Влага может быть поглощена изоляцией обмоток, что снижает ее диэлектрическую прочность и ускоряет процесс старения.

Кроме того, влага повреждает защитный слой лака, находящийся между листами железа, и вызывает появление ржавчины. При неблагоприятных условиях в конечном результате может возникнуть ослабление пакетов железа и увеличение потерь в железе генератора. Температурные расширения и сжатия, повторяющиеся в течение длительного периода времени, также сокращают срок службы изоляции. Важное мероприятие заключается в искусственном регулировании температуры генератора. Это достигается, во-первых, вращением вентиляции генератора сразу же после его остановки. Кроме того, в ряде случаев необходимо применять электрические обогреватели, при вертикальных машинах, устанавливаемые в турбинном колодце, непосредственно под генератором.

На ГЭС Сэнтилла (США), оборудованной двумя вертикальными генераторами по 25 MVA при 450 об/мин, средняя температура окружающего воздуха зимой составляет 0°. С целью повысить температуру генератора во время остановок до 20° потребовалось установить для каждой машины 24 обогревателя мощностью 500 W каждый. Кэлдервуд (США) такими же нагревателями оборудовали вертикальных гидрогенераторов мощностью каждый 1 MVA. В этом случае оказалось существенным, что генератор до каждого его пуска предотвращает возникновение повторных механических напряжений в охлажденной изоляции обмотки статора.

О нагреве гидрогенераторов в периоды их остановки важен для ряда ГЭС СССР, расположенных в условиях холодного и влажного климата.

Н. А. Караулов

Передвижная аварийная электростанция. El. Review, стр. 18, № 3241 и стр. 38, № 3242, 1940.

Новая передвижная электростанция Nunn & Co, Manchester спроектирована на тележке на резиновом ходу, которая может быть прицеплена к любому автомобилю. Назначение передвижной электростанции — обслуживание ремонтных установочных ночных работ и эксплуатация в пожарных командах.

Общий вид электростанции представлен на рис. 1. Электростанция состоит из генератора трехфазного переменного тока нормальной частоты мощностью 22,5 kVA при напряжении 400 V. Привод генератора осуществляется от восьмичилиндрового двигателя внутреннего сгорания, работающего

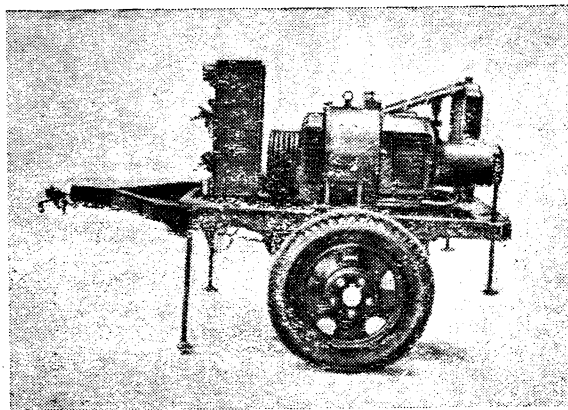


Рис. 1. Передвижная дизель-генераторная установка

на керосине или газе. Радиатор водяного охлаждения двигателя снабжен термостатическим контролем. На этой же тележке расположен распределительный щит со включающей аппаратурой и измерительными приборами. Габарит тележки: длина — 2,44 м, ширина — 1,68 м.

Наряду с описываемым агрегатом для ремонтных работ заслуживает внимания портативный дизель-генераторный агрегат, выпускаемый фирмой Motor Boat Mang. Co. Агрегат Pioneer изготовляется мощностью от 100 до 5000 W. Портативная дизель-генераторная установка снабжена рукоятками для переноски.

Вес портативного агрегата мощностью 200 W составляет всего 21 кг.

Ю. М. Галонен

Е. Hug. Генерирование электрической энергии мускульной силой. Bull. assoc. Suisse des Electriciens № 1, 1940.

Национальная Швейцарская выставка 1939 г. в г. Цюрихе экспонировала установку, демонстрировавшую превращение мускульной силы человека в электрическую энергию. Стенд, с одной стороны, в занимательной форме знакомил посетителей с возможностями превращения силы человека в другие виды энергии и, с другой стороны, дал возможность обследовать широкие массы посетителей и собрать ценные данные о пределах физической энергии человека. Последнее имеет практическое значение вследствие того, что мускульная сила человека применяется для генерирования энергии в ряде случаев — в военных, радиотелеграфных и сигнализаци-

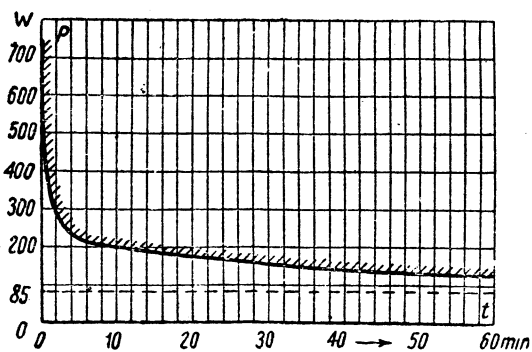


Рис. 1. Кривая физической мощности человека

ционных установках, для вентиляции казематов и противогазовых убежищ, в практике освоения полярных районов, на высокогорных ледниковых станциях различного назначения и т. д. Привод к электрическим генераторам на выставке осуществлялся путем применения колеса с лестничными ступенями, велосипедной установки и ручного привода. Вырабатываемая электроэнергия поглощалась электрическими лампами, превращалась в тепловую или механическую энергию. Для демонстрации электрической работы груз в 3670 kg мог быть поднят на высоту до 1 м, что отвечает работе 10 Wh. Приборы и аппараты установки были проектированы на основе теоретических расчетов и размещены на трех панелях специального щита. Рис. 1 приводит предельную кривую в функции времени физической мощности, показанной в среднем посетителям выставки. Кривая асимптотически приближается к значению длительной мощности — около 83 W ($\frac{1}{4}$ л. с.). Перегрузка может превысить длительную физическую мощность человека в 5—10 раз. Предельная физическая работа человека составляет 0,6—0,7 kWh в течение дня.

Н. А. Караулов

F. Guilot. Пассажирский электровоз для Бразильской железной дороги, Paulista Railway. GER, стр. 151—157, № 4, 1940.

Электрификация линии Paulista Railway началась в 1921 г. В настоящее время находятся в эксплуатации 287 km электрифицированного пути, обслуживаемого 49 электровозами.

В 1939 г. фирма GEC изготовила по заказу этой дороги 4 пассажирских электровоза новейшего образца. Новые электровозы обтекаемой формы с формулой осей 2—С+С—2.

Общий вес электровоза — 165 t при сцепном весе 122 t. Таким образом вес, приходящийся на каждую ведущую ось, составляет 20,4 t. Диаметр ведущих колес электровоза 1165 mm, а бегунковых 910 mm. Общая длина электровоза — 22,8 m, ширина 3,22 m. Кузов электровоза цельнометаллической сварной конструкции (самый большой не сочлененный сварной кузов, построенный до настоящего времени в США).

Максимальная конструктивная скорость электровоза — 145 km/h. Часовое тяговое усилие 15 600 kg при часовой скорости 79 km/h.

Электровоз предназначен для питания от сети постоянного тока напряжением 3000 V. На электровозе установлено 6 тяговых двигателей типа GE-729 часовой мощностью 498 kW при 3050 об/мин на 1500 V каждый.

На новом электровозе предусматривается пневматическое и рекуперативное торможение. В реферируемой статье приводится подробное описание схемы управления электровоза.

Новые электровозы предназначаются для эксплуатации на электрифицированном участке с гористым профилем Jundiahy—Rincao, максимальный подъем которого достигает 18,5‰.

Ю. М. Галонен

G. Bührle. Троллейбусы в Гера. Verkehrstechnik, стр. 33—37, Heft 3, 1940.

В 1934 г. в г. Гера (Германия) были приняты в эксплуатацию дизель-автобусы. Тяжелый профиль с подъемами, достигающими 80‰, оказывал сильное влияние на рентабельность эксплуатации, в связи с чем было принято решение о переходе на троллейбусное сообщение. В ноябре 1939 г. в г. Гера была принята в эксплуатацию первая троллейбусная линия. Курсирующие на этой линии 2 троллейбуса, как и все германские троллейбусы, оборудованы серийными двухколлекторными двигателями. Мощность двигателя составляет 85 kW. Управление двигателем осуществляется с помощью многоступенчатого контроллера с ползунковым контактом.

Новые троллейбусы замечательны тем, что оборудованы одноштанговым токоприемником¹.

Основным достоинством одноштангового токоприемника является упрощение конфигурации контактной сети и повышение маневренности троллейбуса. Одноштанговый токоприемник троллейбусов в г. Гера работает на сменных угольных вставках. Для направления токоприемника на закруглениях служат направляющие ролики из изоляционного

материала, вращающиеся на шарикоподшипниках. Кроме того, головка токоприемника для направления на восток снабжена направляющей шпорой. Давление приемника на одну контактную поверхность составляет 7 kg. Срок службы угольных вставок определяется при в 2000 km.

Первый месяц эксплуатации троллейбусов показал, что расход энергии составляет 1,6 kWh троллейбусо-километр в эксплуатационных условиях пика тока не шали 200 A на троллейбус.

Конструкция контактной сети, в связи с применением штангового токоприемника, позволяет значительно уменьшить расстояние между контактными проводами до 180—200 mm. Интересными являются мероприятия, принятые для предупреждения образования гололеда. Перед началом эксплуатации ежедневно оба провода контактной сети, соны противоположной подстанции замыкаются накороток, что дает эффективные результаты в борьбе с гололедом.

Ю. М. Галонен

J. H. Cansdale и др. Аккумуляторные электромотоциклы. El. Rev., стр. 177—183. 317, № 3247 и 3251, 1939.

За последнее время электромотоцикл находит в Англии широкое применение. Особенно сильный рост электромотоциклов ощущается со времени начала войны 1940 г., когда сказывается недостаток жидкого горючего. В 1939 г. количество находящихся в эксплуатации электромотоциклов в Англии составило 4750 шт.

Наибольшее распространение в Англии электромотоцикл ходит для обслуживания торговой сети. Аккумуляторные электромотоциклы применяются для доставки молока, мяса и других продуктов, а также для вывозки мусора.

Полугрузовые электромотоциклы строятся для полезного груза от 250 до 1500 kg, однако имеются также специальные грузовые электромотоциклы с грузоподъемностью на 2 и даже 5 t. Наиболее распространенным типом в Англии является аккумуляторный электромотоцикл с грузоподъемностью 600—750 kg, оборудованный аккумуляторной батареей емкостью 129—290 Ah.

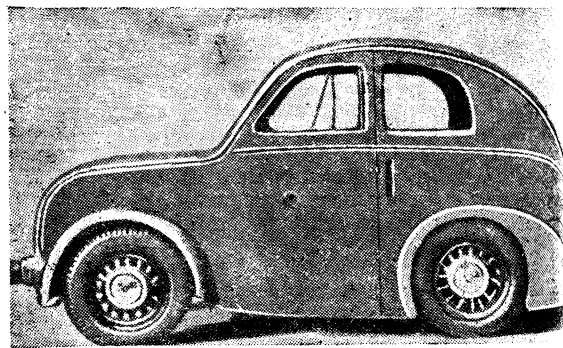


Рис. 1. Миниатюрный легковой электромотоцикл фирмы Clecot Electric Industries

Обычно напряжение аккумуляторной батареи составляет 60—100 V. Электромотоцикл оборудуется исключительно специальными тяговыми батареями (стартерного типа), не чувствительными к тряске и допускающими разрядный ток большой силы. В основном находят применение 2 типа батарей: свинцовые кислотные и щелочные.

Средняя часовая мощность тягового двигателя, применяемого на электромотоцикле, составляет 7,5 л. с.

Максимальная скорость электромотоцикла достигает 48 km/h. Радиус действия на одну зарядку колеблется от 65 до 96 km.

Наряду с распространением полугрузовых электромотоциклов находят широкое применение и легковые электромотоциклы. Рис. 1 представляет миниатюрный легковой электромотоцикл фирмы Clecot Electric Industries.

Кроме того, существуют также электромотоциклы для специальной эксплуатации, служащие для доставки небольших грузов с пассажирами.

Автор указывает на необходимость дальнейшего уменьшения количества электромотоциклов, так как замена обслуживаемых торговых сетей 100 000 грузовых автомобилей электромотоциклами даст годовую экономию около 320 000 000 (70 000 000 галлонов) жидкого горючего.

Ю. М. Галонен

Стремление к освобождению от импортного жидкого топлива вызвало необходимость для Франции интенсивного поиска заменителей жидкого горючего для городского транспорта. Остановившись на возможностях использования древесного и сжатого газов, автор считает однако основным заменителем жидкого горючего — электроэнергию, используемую путем широкого внедрения аккумуляторных электромобилей.

Анализируя возможность применения аккумуляторных электромобилей, автор приходит к выводу, что идея аккумуляторного электромобиля, в самом начале его развития, была извращена предъявляемыми к нему чрезмерными требованиями в отношении скорости и длины пробега.

Автор полагает, что аккумуляторные электромобили полностью удовлетворяют условиям внутригородских перевозок, и особенно пригодны для обслуживания торговой сети. Число аккумуляторных автомобилей Франции автор оценивает примерно в 900 шт., указывая при этом на значительное отставание Франции по производству этого вида транспорта, так как в Германии число аккумуляторных электромобилей достигает 9000, а в Америке составляет порядка 15—20 тыс. шт. В США имеются отдельные предприятия, насчитывающие до 2000 шт. собственных электромобилей.

Распространение аккумуляторных электромобилей во Франции началось около 10 лет назад. Вначале промышленность ориентировалась на более мощные грузовые электромобили грузоподъемностью до 3 т, а затем перешла на электромобили грузоподъемностью, не превышающей 1,2—2,5 т. Вряд ли с этим за последнее время нашли широкое распространение электромобили грузоподъемностью менее 1 т. Автор приходит к выводу, что применение электромобиля в условиях городского движения наиболее эффективно (при относительно небольшом суточном пробеге) при наличии необходимости в частых остановках и небольшой скорости движения.

Статья относится к началу 1940 г.

Ю. М. Галонен

Härry. Результаты эксплуатации аккумуляторных электромобилей. *Bull. Assoc. Suisse des Electriciens, стр. 214, № 9, 1940.*

Аккумуляторные тележки для перевозки багажа уже много лет применяются на вокзалах Швейцарских железных дорог. Эти тележки отлично зарекомендовали себя в эксплуатации, причем стоимость содержания каждой тележки за последние годы составляет около 6800 франков в год, из которых 57% (3900 фр.) составляет зарплата водителей, 9% (1690 фр.) — ремонт, 68% (460 фр.) — энергия и 12% — всевозможные отчисления. Содержание каждой из шести аккумуляторных тележек Бернского вокзала для доставки багажа на дом обходится по 11 000 франков в год, причем из этой суммы 6600 франков (60%) составляет зарплата шофера, 18% (2100 фр.) — ремонт, около 2% (200 фр.) — шины, 5% (550 фр.) — электроэнергия и 15% — всевозможные отчисления. Незначительная стоимость электроэнергии объясняется использованием дешевого ночного тарифа — 10 сантимов за kWh летом и 6 сантимов зимой.

В. А. Соловьев

Н. Арпето. Электромагнитные муфты для судов. *ASEA—Journal, стр. 34—37, № 3, 1940.*

Новая электромагнитная муфта предназначена для передачи крутящего момента от двигателей дизеля к гребному винту судов.

Основными преимуществами электромагнитной муфты по сравнению с другими видами механического сочленения являются: полная надежность конструкции; отсутствие жесткого сочленения обеспечивает возможность поворота гребного винта при ремонтах независимо от вала дизеля. Ограничение максимального момента, передаваемого электромагнитной муфтой, значением 170—250% к номинальному предохраняет гребной винт от поломок при заклиниваниях. Вибрации или не передаются гребному винту, чем достигается более плавный ход судна. Применение электромагнитной муфты позволяет передавать крутящий момент двух или нескольких дизелей на один гребной винт через посредство редуктора. Применение электромагнитной муфты обеспечивает абсолютную плавность пуска и повышает маневренность судна. Электромагнитная муфта состоит из двух частей: из внешней муфты, представляющей собой стальной замкнутый кольцо (остов) с вделанной в него беличьей клеткой,

Остов муфты жестко сочленяется с приводным двигателем и покоится на подшипниковых опорах. Внутри кольца располагается часть муфты, сочлененная с приводным валом, т. е. с редуктором гребного винта. Ротор снабжен электромагнитными полюсами, подобно ротору синхронных машин.

Обмотка ротора возбуждается постоянным током через контактные кольца. Пуск дизеля осуществляется обычно входную с последующим постепенным возбуждением муфты.

К. п. д. всей трансмиссионной установки, включая редуктор, составляет 95—96%, что обуславливается высоким к. п. д. электромагнитной муфты, достигающим 97—98%.

Электромагнитная муфта, смонтированная на испытательном стенде, представлена на рис. 1. Зубцы на периферии остова муфты служат для проворачивания дизеля.

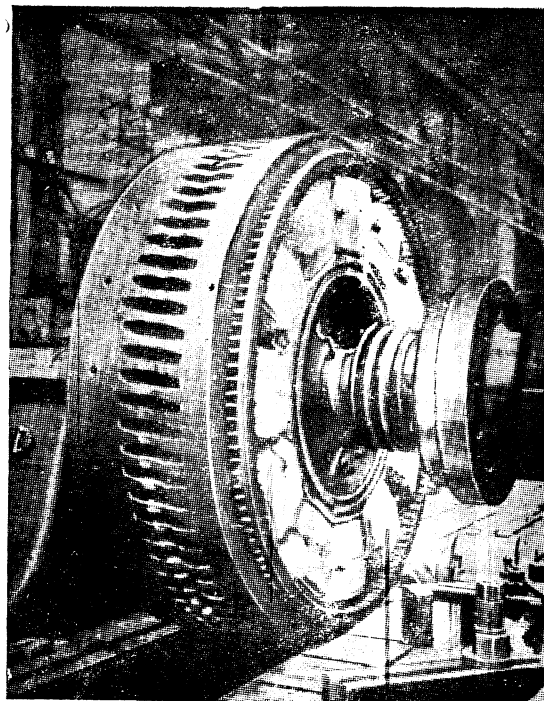


Рис. 1. Электромагнитная муфта для судового привода

Примером применения электромагнитных муфт может служить шведский теплоход *Formosa* водоизмещением 9400 т. На этом теплоходе был установлен ранее двигатель Дизеля 3100 л. с. Использование электромагнитных муфт дало возможность переоборудовать теплоход на 4 дизеля по 1280 л. с., 300 об/мин каждый, работающих через редуктор на один гребной винт. В результате получилось значительное повышение скорости судна с 11,5 до 14 узлов в час.

До настоящего времени электромагнитными муфтами ASEA оборудовано 16 судов, на которых установлено 63 электромагнитных муфты, передающих суммарную мощность в 83 340 л. с.

Самая большая построенная до настоящего времени ASEA электромагнитная муфта — это муфта типа S-206, служащая для передачи мощности в 3600 л. с. при 215 об/мин.

Ю. М. Галонен

А. С. Hordy. Электрификация флота. *The Electrician, стр. 141, № 3221, 1940.*

До недавнего времени электричество на кораблях служило только для вспомогательных целей.

Но несколько лет назад в США электричество использовалось для вращения корабельных гребных винтов, главным образом на специальных судах. Наконец, одна из фирм построила корабли с электродвигателями, приводящими в движение винты океанских танкеров, применив вначале дизельэлектропередачу, а затем и турбоэлектропередачу. В конце прошлого года другая фирма выпустила три корабля, причем один из них был оборудован турбогенератором в 5000 л. с. на одном валу, позволяющем судну развивать скорость в 24 км/ч при нагрузке его нефтью в 156 000 барелей (250 000 гектолитров). Перелив нефти из судна происходит при применении электронасосов и требует 11 ч.

В Германии за последние два года технике электропривода судов уделяют большое внимание, используя турбоэлектропередачу с котлами La Mont. Интересна в этом отношении электроустановка на пароходе «Heliholand», построенном для обслуживания линии Гамбург—Америка. На нем установлены два 1650/1750 kW, 3500 V турбогенератора с трехфазной передачей энергии к двум 2000 л. с. 6000 об/мин вертикальным, синхронным двигателям, приводящим в движение гребной винт через редуктор (6:1). Генератор используется также для питания осветительных и нагревательных цепей через два 250 kVA, 380/220 V трансформатора. Турбина получает пар от двух котлов La Mont; расход пара при наиболее экономичной нагрузке составляет 4,5 kg/kWh. Ток от генератора подводится к винтовым электродвигателям неревверсивного типа. Поскольку винты работают всегда в одном направлении при постоянной скорости, скорость и направление движения судна изменяются поворотом лопастей.

М. Д. Трейвас

S. Withington. Тенденции в развитии движущей силы на железнодорожном транспорте. *El. Eng., стр. 141—148, № 4, 1940.*

Одной из важных проблем железнодорожного транспорта в настоящее время является увеличение скорости поездов. Это требует увеличения мощности и уточнения конструкции различных видов движущей силы: паровозов, дизель-локомотивов и электровозов, обслуживающих пассажирское и товарное магистральное, а также товарное местное и маневровое движение. Сравнение упомянутых видов локомотивов, обладающих различными характеристиками, вообще достаточно затруднено; но взятое по отношению их веса на единицу мощности сравнение показывает, что вес стандартного паровоза с тендером составляет 85—100 кг/л. с.; дизель-локомотива 67—72,5 кг/л. с., а электровоза 45—55 кг/л. с. Соотношение их стоимостей, если взять стоимость паровоза за 100%, составляет для электровоза 250% и для дизель-локомотива — 330%. Однако, приняв во внимание допускаемые этими локомотивами кратковременные перегрузки, можно эти цифры изменить в сторону их уменьшения; так, для 90% перегрузочной способности электровоза относительная стоимость его падает до 130%, а вес до 25—30 кг/л. с.

Рассматривая различные типы локомотивов, приходится констатировать, что паровоз, несмотря на ряд крупных усовершенствований в его конструкции, все еще имеет термический к. п. д., равный 7—8%, и что одним из достижений является увеличение длины пробега между осмотрами со 160 до 800—1200 km. Поэтому применение дизель-локомотива, обладающего термическим к. п. д., равным 25—30%, находит все большее применение на железнодорожном транспорте, особенно в легковесных высокоскоростных поездах. Машины эти строятся от 4 до 12—16-цилиндровыми, вертикальными или V-образными, мощностью 750—1200 и даже 2000 л. с. с электрической, механической и гидравлической передачей.

В области электрической движущей силы также имеется тенденция к концентрации мощности в одной единице и к увеличению скорости электровозов. Широкое развитие последних стало возможным благодаря улучшениям в конструировании тяговых двигателей и других механических и электрических деталей.

За границей и в частности в США имеется определенная тенденция к отказу от шатунно-рычажной передачи и переходу на индивидуальную передачу через зубчатки, при этом применяют как простую жесткую, так и эластичную передачу.

Что касается тяговых двигателей, то за последние 10 лет отмечается улучшение в их проектировании, в особенности однофазных двигателей. Улучшение коснулось щеткодержателей, увеличения числа полюсов, конструкции коллектора, допускающего большие окружные скорости, изоляции, увеличения к. п. д. вентиляции и т. п.

Однофазные двигатели допускают теперь повышенные напряжения при больших скоростях. Регулирование напряжения на однофазных электровозах производится посредством переключения отпаяк как вторичной, так и первичной обмоток силового трансформатора.

В Европе широко применено электрическое торможение, причем для осуществления рекуперативного торможения как электровозы постоянного тока, так и электровозы однофазного требуют незначительного добавочного оборудования.

Интересные работы проведены по использованию однофазного тока при частоте 50 Hz для электрических железных дорог.

Построенный в 1932 г. в Венгрии фазопреобразователь электровоз на 50 Hz успешно работает и в настоящее время. Тяговый двигатель электровоза, питаемый от фазопреобразователя, приводит электровоз в движение посредством шатунной передачи. На недавно построенных электровазостатор фазопреобразователя имеет две главных обмотки: однофазную, подсоединенную к линии, и многофазную к тяговым двигателям.

Германские железные дороги, проводя подобные же экспериментальные работы с однофазным током 50 Hz при испытывают несколько типов электровозов: с фазопреобразователями и трехфазными двигателями, ртутными выпрямителями и стандартными серийными двигателями и одними серийными коллекторными двигателями 50 Hz. Эксплуатация построена ряд мощных электровозов: часомощностью 12000 л. с. с 16 тяговыми двигателями Сн. Готтардской линии; 3600 л. с. (длительной мощности) с 6 парами двойных двигателей для дороги Нью-Йорк. Эти примеры еще раз подтверждают тенденцию к концентрации мощности в одной движущей единице.

М. Д. Тре

Развитие британской техники в области ртутных выпрямителей. *BEAMA Journal, стр. 96—99, № 34, 1940.*

1939 г. является годом дальнейшего развития в области приготовления ртутных выпрямителей — металлических с жидким охлаждением (для высоких напряжений), металлических отпаянных (безнасосных) с воздушным охлаждением и клянных выпрямителей (для более низких напряжений).

В области отпаянных выпрямителей больших успехов достигла фирма British Thomson—Houston Co, Ltd., выпустившая несколько таких выпрямителей по 1500 kW при 2000 kW при 630 V. Ею же изготавливаются 12—1500 630 V 12-фазных выпрямителей с водяным охлаждением. Из выпрямителей с управляющими сетками для регулирования напряжения и защиты фирма изготовила два 1500-V выпрямителя для дорог Нового Уэльса, два 1500-V и один 2500-kW, 3000-V для Южной Африки. Необходимо отметить, что эта же фирма выполнила заказ на 300-kW и девять 400-kW выпрямителей для напряжений 10000—15000 V. Эти выпрямители оборудованы также точным управлением для регулирования и защиты, что осуществляется через быстродействующее реле.

Что касается стеклянных выпрямителей, то, помимо маломощных (3,6—15 kW) и низковольтных (60—10 kV) выпрямителей, а также ряда выпрямителей средних мощностей (40—800 kW) и напряжений (200—500 V), для Зеландских железных дорог фирма изготовила две новки по 1800 kW, 1600 V; каждая из установок состоит из шести колб, работающих параллельно и питающих одного шестифазного трансформатора. Подобный агрегат выдерживает следующие перегрузки: 50% — 1 h; 100% — 15 min; 160% — 5 min и 300% — мгновенно. Для поддержания наилучшей рабочей температуры колб скорость охлаждающих их вентиляторов автоматически изменяется в зависимости от нагрузки.

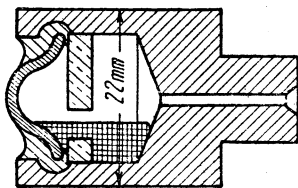
Фирма GEC, являющаяся пионером в области построения отпаянных, воздухоохлаждаемых металлических выпрямителей, продолжала в 1939 г. их усовершенствование. В результате выпущены выпрямители мощностью в 500 630 V; 1000 kW, 1500 V и 1500 kW при 3000 V с управляющими сетками и без них.

Ввиду большого интереса к подобным выпрямителям заказ на эти выпрямители для промышленности определен суммарной мощностью 20000 kW и для транспорта 38000 kW.

Наконец, фирма English Electric Co выпустила стандартные отпаянные выпрямители, но не со стеклянной, а с металлической колбой. Большое количество подобных выпрямителей было заказано адмиралтейством и министерством авиации, а также для трамвая, водонасосных станций, новых двигателей и т. п. Эти выпрямители представляют собой простую шестиполупроводниковую колбу, смонтированную в изолированной раме; колбы могут быть оборудованы охлаждающими сетками. Простота колбы сильно содействует замене вакуумное уплотнение, при котором фарфор изолятор припаян непосредственно к металлу сосуда выпрямителя, что создает великолепный вакуумный непроницаемый шов. За последние 5 лет подобные уплотнения с успехом применены фирмой на различных типах выпрямителей.

М. Д. Тре

Реферируемая статья посвящена исследованию влияния тока и давления газа, заполняющего камеру ртутного выключателя на дугу, возникающую при замыкании и размыкании тока. Исследования производились на выключателях конструкции рис. 1 диаметром $\frac{7}{8}$ " (22 mm), а также на сходных с ними по конструкции ртутных выключателях для бытовых приборов. Автор нашел, что время существования дуги а также разрывная мощность сильно зависят от состава давления газа. Время существования дуги уменьшается, разрывная мощность растет вдоль ряда газов: аргон, азот, и водород.



- Феррико
 Стекло
 Керамическое кольцо
 Ртуть

Рис. 1

Для водорода время существования дуги уменьшается, разрывная мощность растет с ростом давления. Приведенные в статье данные могут быть сведены в следующую таблицу:

Газ	Давление at	Максимальный разрывающий ток при постоянном напряжении 250 V	Время существо- вания дуги при разрыве постоян- ного тока в 1 A sec
Аргон . . .	1	0,12	0,2
Азот . . .	1	1,4	0,014
Водород . . .	1	1,4	0,013
Водород . . .	1	100	0,0001
Водород . . .	30	500	0,00002

пересно отметить, что при заполнении пространства над водородом при давлении около 30 ат миниатюрным выключателем можно было включать и выключать активную нагрузку в 40 kVA (при $\cos \varphi \approx 0,5$).

А. И. Фройман

Влияние высших гармонических в питающем напряжении на гармонические выпрямленного напряжения и первичного тока. *Arch. f. El., стр. 209, № 4, 1940.* Высшие гармоники в напряжении, питающем выпрямительную установку, влияют на режим установки двояким образом. С одной стороны, они изменяют амплитуду высших гармонических выпрямленного напряжения и первичного тока. При этом, каждая гармоника питающего напряжения в основном только на те гармонические, порядок которых близок к ее собственному порядку. С другой стороны, высшие гармоники изменяют нагрузочную характеристику установки. Новая характеристика записывается между двумя предельными характеристиками, падающими к исходной и отстоящими от нее на величину $\frac{E_n}{E_1}$, где n — порядок гармоники, а E_n — амплитуда

гармоники питающего напряжения. Изолированно работающего шестифазного выпрямителя влияния обычно мало существенны. Для выпрямителя с большим числом фаз (12, 18 и т. д.) наличие высших гармоник в первичном напряжении сдвигает в разрыве характеристики отдельных шестифазных групп, что может быть разбит такой выпрямитель. Если питание всех анодов выпрямителя одинаковое, то нет к неравномерной нагрузке отдельных шестифазных групп. Если же токи отдельных групп будут поданы постоянными посредством сеточного регулирования отдельных групп, будут отличаться по углу задержки перекрытия анодов. Как в первом, так и во втором случае формы кривых напряжения и тока ухудшаются.

Я. М. Червоненкис

В настоящее время для всех новых бумагоделательных машин устанавливается исключительно многодвигательный привод. Одновдвигательный привод применяется лишь при реконструкции бумагоделательной машины старого типа. При регулировании скорости отдельных секционных двигателей током возбуждения максимально-достижимые пределы регулирования соответствуют 1:6. При малой скорости, т. е. низком значении напряжения на якоре необходимо значительно большее ослабление потока, чем при высокой скорости для одного и того же процентного изменения скорости, вследствие чего двигатели при малой скорости работают с пониженным значением момента.

Двигатели с малым падением напряжения имеют значительно большие габариты и более высокую стоимость, чем нормальные. Поэтому целесообразно регулировку скорости отдельных двигателей производить напряжением на якоре, оставляя величину потока постоянной. Для этого последовательно с якорями двигателей включаются вольтодобавочные машины, мощность которых определяется номинальным током двигателей и падением напряжения в якоре. Если применяется согласное-встречное включение, то габариты их получаются весьма небольшие.

При такой системе двигатели работают на полном потоке и развивают значительный момент и при низком числе оборотов. Регулирование скорости осуществляется изменением тока возбуждения вольтодобавочной машины. Возможные пределы регулирования в этом случае достигают 1:20. Несколько вольтодобавочных машин может быть объединено в один агрегат с одним асинхронным двигателем. Для двигателей наката применяется регулирование скорости в зависимости от потребляемой силы тока, что дает постоянное натяжение бумажного полотна при возрастании диаметра рулона.

Для специальных сортов бумаги в основном используется цапфовый привод, однако в настоящее время он уже начинает находить применение для средних по качеству сортов бумаги и даже для газетной бумаги. Цапфовый привод работает бесшумно даже при весьма высоких скоростях.

Привод бумагоделательной машины может быть осуществлен и на переменном токе с шунтовыми коллекторными двигателями, однако пределы регулирования скорости должны быть не больше 1:3, так как при большем диапазоне значительно возрастает стоимость и габариты машины. Регулирование на всем диапазоне осуществляется с помощью регуляторов синхронного хода, воздействующих на передвигание щеток в двигателях, питаемых с ротора или на поворот потенциал-регулятора в двигателях, питаемых со статора. Поэтому регулятор синхронного хода устанавливается и на двигателе наката, где при постоянном токе его нет.

Для получения заправочной скорости устанавливается вспомогательный асинхронный двигатель с редуктором и муфтой, расцепляющейся при высоких скоростях. Привод на переменном токе вследствие больших размеров двигателей и большего их веса (в 2—3 раза) в цапфовом исполнении осуществлен быть не может.

Коэффициент полезного действия привода на переменном токе при диапазоне регулирования 1:3 получается на 5—10% выше, чем на постоянном токе. Однако повышенный к. п. д. обычно не компенсирует значительно большую стоимость электрооборудования (при диапазоне регулирования 1:3 на 30—50%) и те преимущества, которые получаются при установке двигателей постоянного тока. Поэтому можно считать, что и в будущем привод бумагоделательных машин в основном должен осуществляться на постоянном токе.

Ю. А. Сабинин

Особенностью описываемой установки, в которой поверяемый и эталонный счетчики нагружаются одинаково, является отсутствие непосредственной механической связи между измерительной системой и приводом устройства для определения погрешностей (рис. 1), благодаря чему повышается точность установки. Управление приводом этого устройства осуществляется фотоэлектрическим путем.

Световой поток, идущий от источника света к фотоэлементу, регулярно прерывается диском с отверстиями, расположенным на оси эталонного счетчика. Благодаря этому в цепи фотоэлемента возникает переменный ток, частота которого прямо пропорциональна числу оборотов эталонного счетчика. От этого тока работает синхронный двигатель, который приводит в действие устройство для определения погрешно-

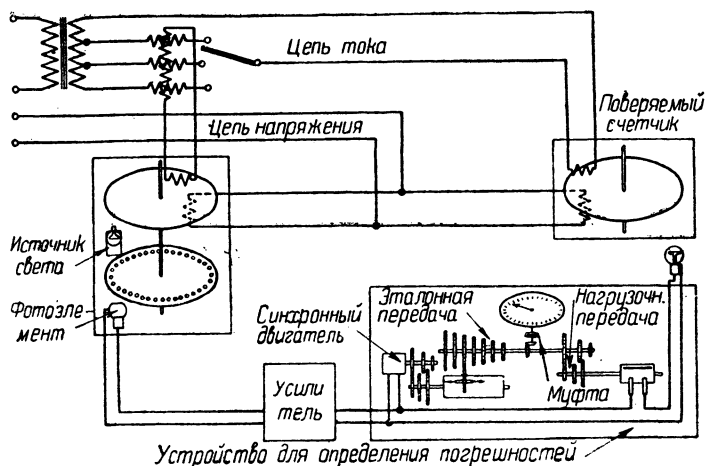


Рис. 1. Принципиальная схема для испытания счетчиков

стей. Последнее состоит из эталонной передачи, с помощью которой получается начальное число оборотов, соответствующее постоянной поверяемого счетчика, и из «нагрузочной» передачи, посредством которой получается число оборотов, равное уже числу оборотов поверяемого счетчика при той или иной нагрузке.

Передачные числа подобраны так, что при достижении поверяемым счетчиком должного числа оборотов замыкается контакт сигнального устройства. Установка позволяет быстро выяснить разность числа оборотов поверяемого и эталонного счетчиков и добиться минимально-возможной погрешности, последняя непосредственно определяется по шкале, которая имеется в устройстве для определения погрешностей и пригодна для проверки счетчиков с любой постоянной. С помощью описанного устройства можно производить проверку также трехфазных счетчиков, для чего требуются три однофазных эталонных счетчика.

Н. А. Шостыин

Hermann. Пьезоэлектрические измерительные приборы. AEG-Mittel. 497, № 12, 1939.

Приборы для снятия индикаторных диаграмм в двигателях внутреннего сгорания должны удовлетворять целому ряду условий: иметь высокую частоту собственных колебаний, быть нечувствительными к сотрясениям, обладать стабильной во времени постоянной, иметь малые размеры, регистрировать импульсы давлений.

Перечисленным требованиям отвечают пьезокварцевые измерители давления, состоящие из пьезокварцевого датчика, усилителя постоянного тока и катодного осциллографа.

Основные характерные черты пьезокварцевых датчиков:

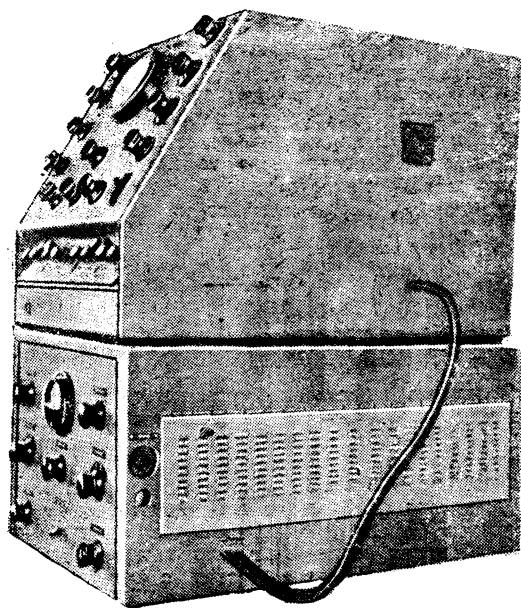


Рис. 1. Общий вид лампового электрометра с двухлучевым катодным осциллографом

а) высокая частота собственных колебаний, достигающая 30—50 кГц; б) нечувствительность к сотрясениям; в) постоянная датчика не зависит от температуры в пределах 300°.

Выделяющиеся в датчике электрические заряды измеряются посредством лампового электрометра (постоянная времени входного контура 10—15 мин). Датчик соединяется с электрометром с помощью специального шланга (емкость шланга $\sim 40 \mu\text{F/m}$). Показания лампового электрометра регистрируются катодным осциллографом. Наибольшая чувствительность прибора составляет (при нормальном давлении) 15 мм/ат.

На рис. 1 показан общий вид лампового электрометра (для двух датчиков) и двухлучевого катодного осциллографа (установлен сверху).

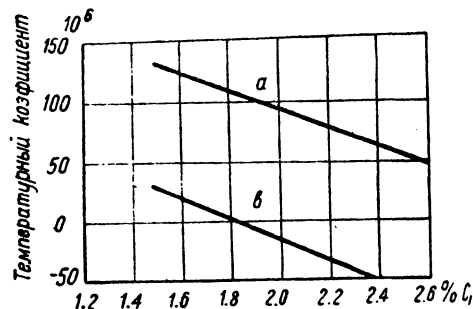
Масштаб времени в катодном осциллографе задается с помощью специального приспособления, механически связанного с валом исследуемого двигателя.

Градировка прибора производится сжатым воздухом, давление которого измеряется манометром. В случае уменьшения постоянной времени входного контура электрометра долей минуты (вследствие ухудшения изоляции датчика шланга и т. п.), градуировка должна производиться в приложениях периодически изменяющегося давления.

М. С. Либ

A. Schulze. Золото-хромистые сплавы сопротивлений. АТМ № 105, 1940.

При применении сплавов сопротивлений из благородных металлов для прецизионных сопротивлений особенно применимы оказываются сплавы золота с хромом. Проведенные исследования показали, что если удельное сопротивление чистого золота при 20° составляет $0,02 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$, то незначительное добавление Cr сильно повышает его сопротивление. Уже при содержании 1,8% Cr удельное сопротивление повышается до $0,27 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$, а при 2,5% Cr достигает $0,41 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$. Одновременно с этим сильно изменяется температурный коэффициент. Изменение температурного коэффициента различных концентраций сплава Au—Cr показано на рис. 1. Кривая а относится к твердотяннутому образцу, кривая б дана для отожженного образца. Соответствующим термообработкой температурный коэффициент может быть приведен до 0. Исследования показали, что наиболее пригодным для этих целей является сплав с содержанием 2,05% Cr. Его сопротивление при 20° равно $0,33 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$. Электропроводящая сила по отношению к меди составляет 7—8 μV на 1°.



Из этого сплава были изготовлены сопротивления с диаметром проволоки 0,6 мм, 10Ω 0,3 мм, 10 0,1 мм, 1000Ω —0,04 мм. Проволока была бифилярная на фарфоровый цилиндр, после чего сопротивления подвергнуты отжигу при 200° в течение 20 часов с медленным охлаждением, а затем покрыты. Исследование этих сплавов в течение 3 лет показало незначительное изменение температурного коэффициента удельного сопротивления. При этом установлено, что сопротивления из сплава Au—Cr очень чувствительны к влаге воздуха, а потому и могут использоваться в помещениях с постоянной влажностью или должны помещаться в герметически закрытом сосуде, наполненном инертным газом.

П. П. Л

Hermann. Замена двух правил «трех пальцев» ETZ, стр. 105—106, № 5, 1940.

Правила «трех пальцев» правой и левой руки можно заменить одним, если исходить из движения электромагнитного поля, причем одновременно достигается объяснение электромагнитных явлений в последнем. При движении электрона за плоскость чертежа (рис. 1 и 2) взаимно

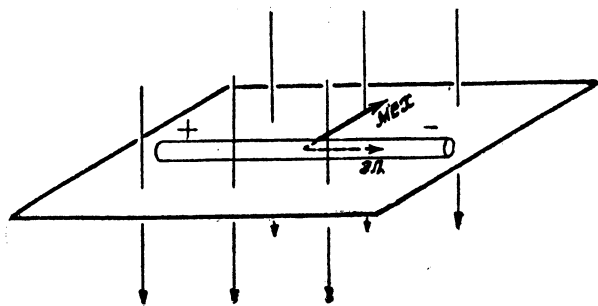


рис. 1. Движущийся проводник в магнитном поле. Старое правило правой руки. Стрелка „мех“ показывает начальное, а стрелка „эл“ — новое направление движения электронов

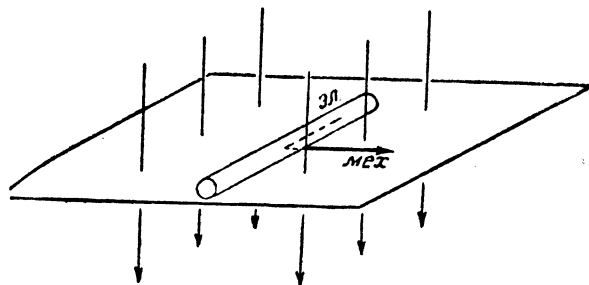


рис. 2. Обтекаемый током проводник в магнитном поле. Старое правило левой руки. Стрелка „эл“ показывает начальное, а стрелка „мех“ — новое направление движения электронов

внешнего магнитного поля и магнитного поля, возникающего вокруг движущегося электрона, заставляет последний отклониться вправо. Если, как указано на рис. 1, проводник вместе с покоящимися в нем электронами движется в магнитном поле по направлению стрелки «мех» (за плоскость чертежа перпендикулярно полю), то электроны смещаются вправо, увлекают проводник за собой. Отсюда получается следующее правило: если большой палец левой руки направлен в сторону начального движения электронов (происходящего вместе с проводником или внутри последнего), а указательный палец показывает направление магнитных линий, средний палец укажет направление нового движения электронов. При пользовании этим правилом следует учиты-

вать, что направление движения электронов в проводнике является обратным тому направлению, в котором, как обычно принимают, протекает электрический ток.

Н. А. Шостыин

С. Moler. Экономичность регулирования напряжения в сельскохозяйственных сетях сериес-конденсаторами. *El. World, стр. 883 и 947, № 13, 1939.*

Стоимость сериес-конденсаторов невысока и вполне приемлема для применения их в сетях малой мощности. Однако до настоящего времени стоимость защитных устройств для них была весьма значительна. Недавно в США (штат Мериленд) осуществлена дешевая защита сериес-конденсаторов. На конденсаторе 5 kVA, 460 V были установлены контактор на одном его бушинге и разрядник на другом (рис. 1). Катунка контактора включалась последовательно в цепь нагрузки, и контактор замыкал конденсатор, когда ток в главной цепи достигал величины, соответствующей полной нагрузке. Разрядник шунтирует конденсатор при перенапряжениях. Стоимость конденсатора составляла 45,1 долл., раз-

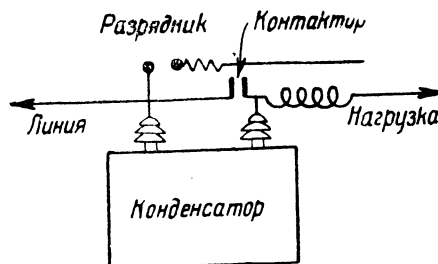


рис. 1. Защитное устройство сериес-конденсатора

рядника 2,67 долл.; контактора 12,8 долл. Вся установка монтировалась на нормальной опоре и предназначалась для регулирования напряжения в сети с максимальной нагрузкой 25 kVA при $\cos \varphi = 0,8$.

В статье показаны схема линии 2,3 kV, в которой был установлен описанный сериес-конденсатор и графики напряжения вдоль линии с конденсатором и без него. Установка находилась в эксплуатации около тринадцати месяцев и работала вполне удовлетворительно.

За время эксплуатации контактор сработал три раза.

В установках с низким коэффициентом мощности сериес-конденсаторы имеют существенные преимущества перед другими способами регулирования напряжения в сетях, в частности, перед бустерными регуляторами. Они обеспечивают лучшее регулирование, исключают мигания света у потребителей, лучше защищены от перегрузок и перенапряжений, дешевле и требуют меньше места.

И. А. Будзко

Электропаяльники Бартеля

Образцовой конструкции и высокой производительности; экономные и надежные.

Требуйте проспекты

„Barthel No. 2010“

Gustav Barthel, Dresden-A. 21 Ve



Импортная торговля может последовать лишь на основании действующих в СССР правил о монополии внешней торговли.

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

редактор Я. А. КЛИМОВИЦКИЙ
редакция М. Г. Башкова.

Обл. Библиотека

ИЗДАТЕЛЬ Госэнергоиздат
Техн. ред. С. К. Курапов

в набор 4/VII 1940 г.

Подписано к печати 26/VIII 1940 г.

Печ. л. 11. Авт. л. 13,5

В 1 п. л. 60307 зн.

Стат. формат 60×92¹/₈ д. л.

Заказ 2162.

Тираж 10200

13-я тип. ОГИЗа РСФСР треста «Полиграфкинг». Москва, Денисовский 30.



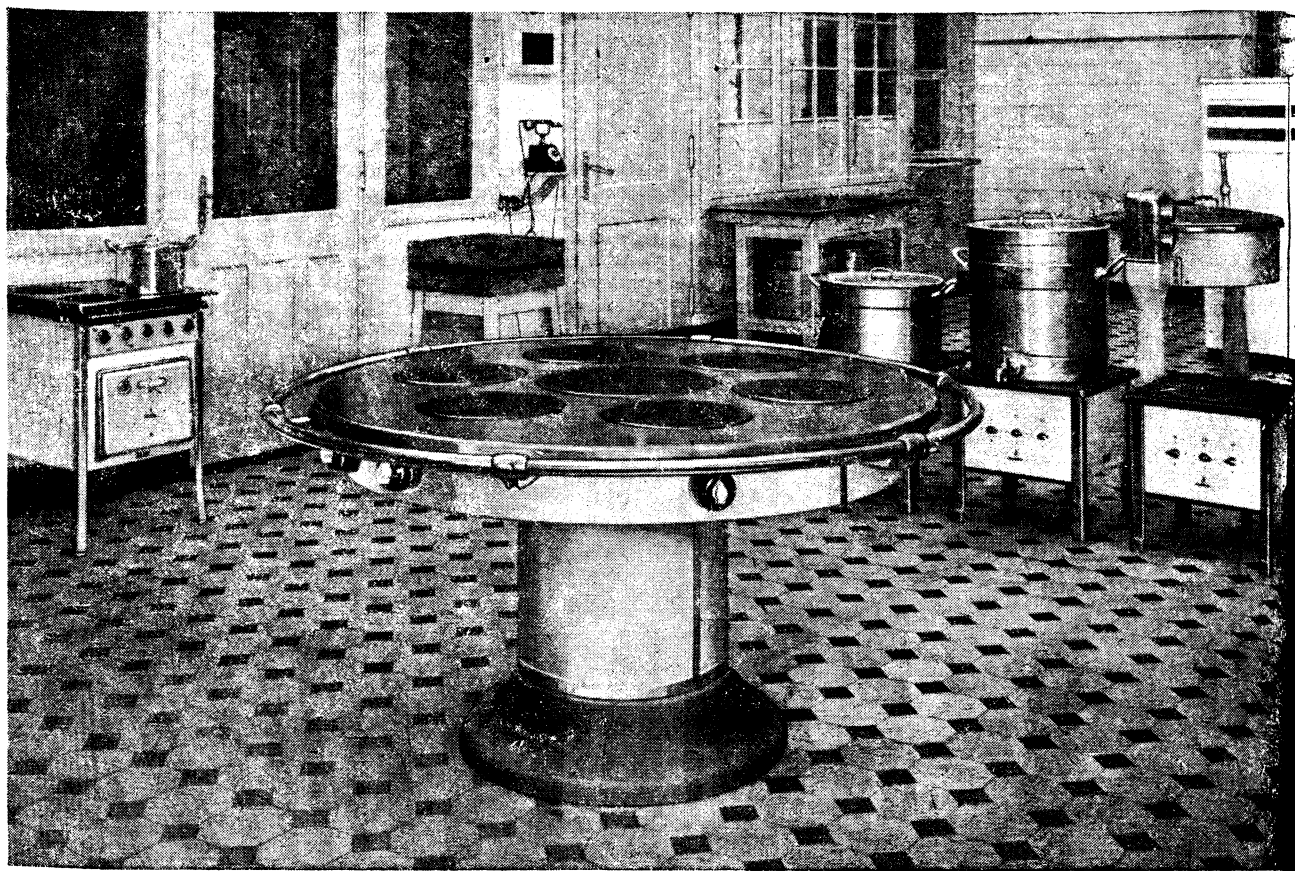
КУХНИ МАССОВОГО ПИТАНИЯ

Целесообразное расположение оборудования

Экономичность

Ударная работа при наплыве столующихся

Немедленная готовность к действию



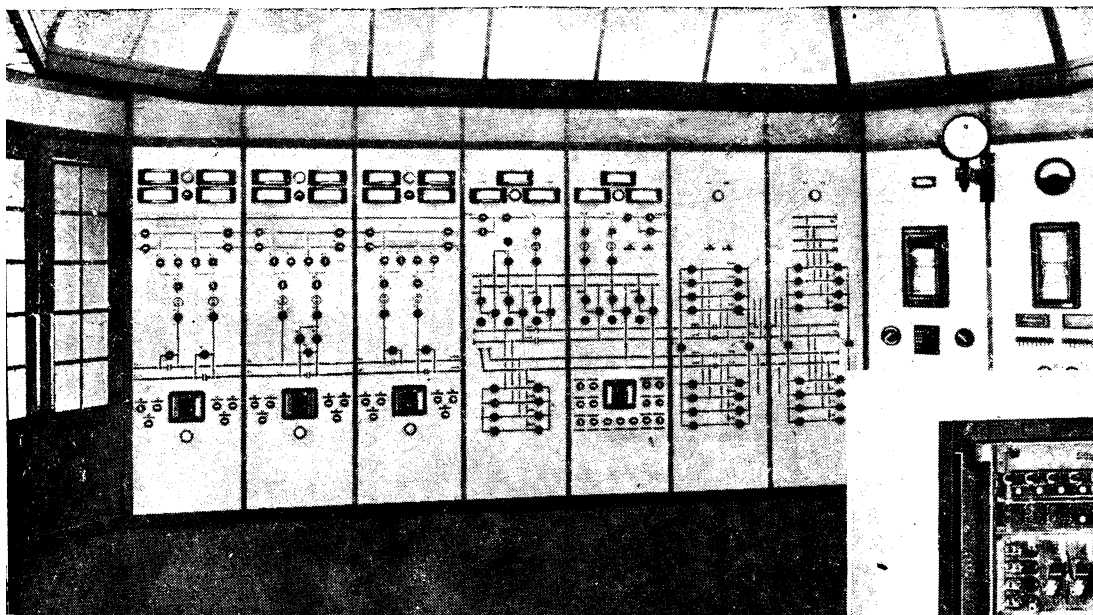
С запросами просим обращаться по адресу

SIEMENS-SCHUCKERTWERKE AG · TECHNISCHES BÜRO
BERLIN-SIEMENSSTADT

Выписка заграничных товаров может последовать лишь на основании действующих в СССР правил о монополии в торговле.

ДИСПЕТЧЕРСКИЕ УСТАНОВКИ

для планомерного и надежного дистанционного управления и контроля энерго-
снабжения сетей электрических железных дорог

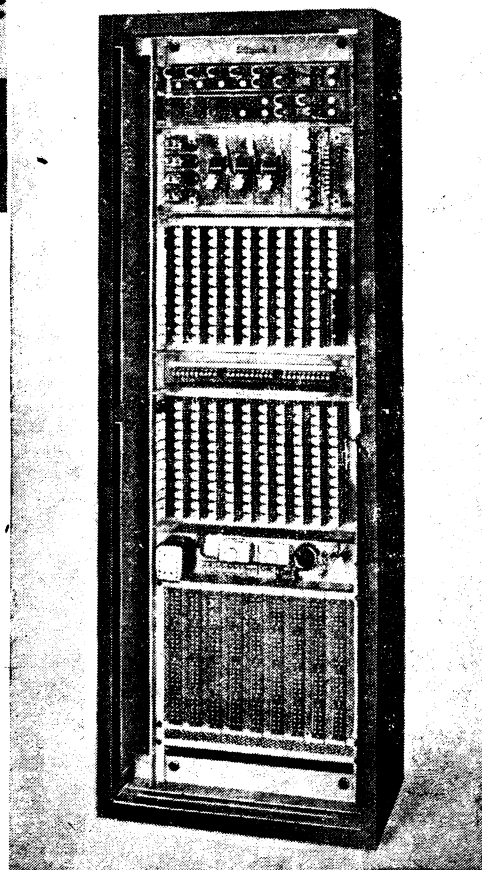


Частичный вид диспетчерского пункта управляющего выпрямительными
подстанциями и узловыми пунктами соединения.

Техника телеуправления объединяет все устройства по цен-
трализации управления замкнутыми системами или связан-
ными между собой частями систем.

Устройства дистанционного управления Сименса обеспечивают:

1. Недопущение ошибочных операций и сигнализаций.
2. Проведение операций и обратной сигнализации
положения каждого объекта в несколько секунд.
3. Одновременное исполнение нескольких команд
после подготовительной установки, одним пово-
ротом командного искателя.



Диспетчерская аппаратура для управляю-
щего и управляемых пунктов.

С запросами просим обращаться по адресу

SIEMENS-SCHUCKERTWERKE AG · TECHNISCHES BÜRO OST
BERLIN-SIEMENSSTADT

AZRd. 20

Экспорт заграничных товаров может последовать лишь на основании действующих в СССР правил о монополии внешней торговли.

Производственные достижения фирмы AEG в 1939г.

Сообщение фирмы AEG

Дальнейшее выполнение четырехлетнего плана и хозяйственное развитие повели в прошедшем году к бурному росту почти всех отраслей промышленности. На долю фирмы AEG выпало также немалое количество возможностей, использование которых привело к результатам интересным как в техническом так и в хозяйственном отношении. Наиболее замечательные достижения отмечены нами ниже. Также и для иностранной промышленности фирма AEG выполнила ряд весьма интересных установок.

Промышленность, добывающая сырье, сдала в прошедшем году большие заказы на выпрямительные установки для электролиза. Возросшие требования в этой области повели к выпуску выпрямителя на 8000 А при 800 В. Для установок в 500 ... 6000 А особенно оправдался новый безнасосный железный выпрямитель с воздушным охлаждением. Целый ряд мотор-генераторов с мощностями до 10 000 А при 300 В поставлены нами для электролиза и иных целей.

Для прокатных станков для горячей и холодной прокатки было поставлено много установок для приводов и управления. Один из двойных двигателей для привода тяжелого 900 мм - ового четырехклетьевого прокатного тристана замечателен своими размерами; он представляет собою двух-якорный двигатель постоянного тока мощностью при нормальной постоянной нагрузке в 10 800 kW при 94 об/мин; максимальная мощность его достигает 40 700 kW. Этот привод является таким образом наибольшим в мире приводом к прокатному стану. Кроме этого главного двигателя был поставлен целый ряд вспомогательных двигателей.

В горной промышленности в истекшем году была сдана в эксплуатацию крупнейшая в мире под'емная машина, обладающая под'емной мощностью в 572 tkm/h. Она приводится в движение двигателем постоянного тока длительной мощностью в 3700 kW и максимальной мощностью в 7500 kW. Буровые копи пустили в ход значительное число крупных мостовых перегружателей, экскаваторов и сыпателей с поставленным фирмой AEG электротехническим оборудованием.

Центробежные компрессоры для горного дела были также поставлены в значительном количестве. Единичная средняя мощность этих машин возросла примерно до 65 000 m³/h. Большие центробежные компрессоры были сданы в эксплуатацию в химической промышленности и для дальнейшего газоснабжения. Главным образом для привода мощных поршневых компрессоров гидрогенизационных установок было заказано 40 тихоходных двигателей трехфазного тока общей мощностью в 94 000 kW.

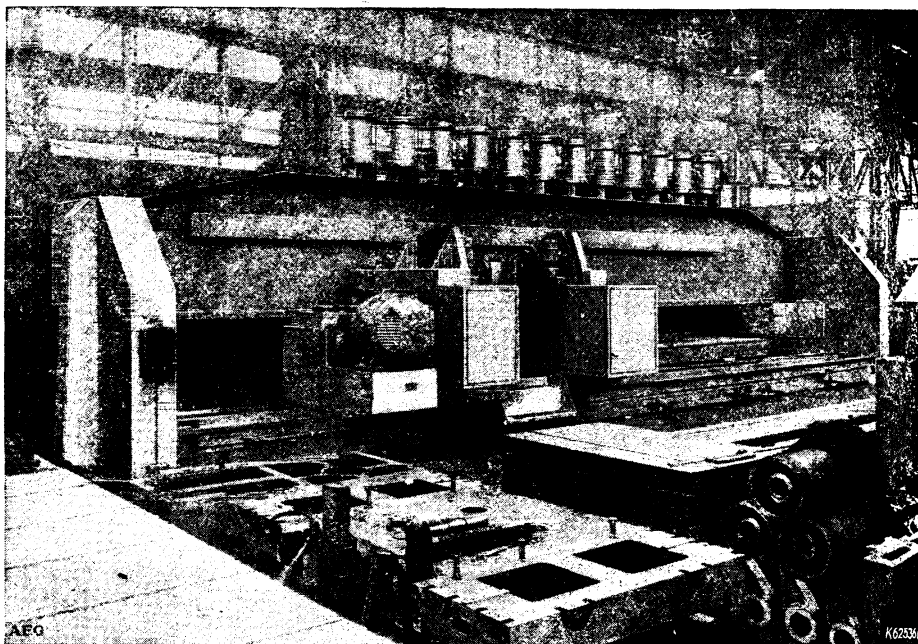
В области под'емных сооружений были поставлены зарекомендовавшие себя электро-гидравлические тормазные устройства «Eldro» для большого числа монтажных и литейных кранов, а также портовых кранов для перегрузки тюков и грейферного типа. Среди оборудованных фирмой AEG портовых сооружений следует упомянуть под'емный мост в портовой части Бока в Буэнос-Айресе.

Значительные размеры приняли также поставки электротехнического оборудования к металлообрабатывающим станкам. Для первой очереди строительства завода народных малолитражных автомобилей фирма AEG имела возможность поставить почти все двигатели для механического цеха. К мощным станкам было заказано большое число двигателей постоянного тока, в частности

в виде быстроходных приводов Леонарда к строгальным станкам (см. рисунок).

Недавно разработанные машины для точечной и шовой сварки с каскадным управлением были в большом количестве поставлены за границу. В области дуговой сварки наибольший интерес был проявлен к автоматическим сварочным установкам.

Мощные дуговые печи для электростали получили в отчетном году возможность дальнейшего развития; из поставленных установок особенно замечательна установка из двух печей по 40 t емкостью каждая; эта установка принадлежит к числу крупнейших в мире. Особое внимание



Строгальный станок с электрическим приводом AEG

было обращено на дальнейшее развитие печей для окисляющего накала и установок с защитным газом. В настоящий момент нами строятся две мощные толкательные печи с общей длиной в 32 m и полезным сечением 1000 × 500 mm², которые следует отнести к числу крупнейших в Германии проходных печей с защитой газами. Новая конструкция под'емного шлюза существенно снижает расход защитного газа.

Для бумажной и текстильной промышленности были разработаны и поставлены в Германии и за границей многочисленные специальные приводы и распределительные устройства.

В области исследовательской и испытательной работы в промышленности были построены испытательные установки для двигателей внутреннего сгорания и иных машин. В качестве достижения в этой области можно рассматривать находящийся еще в стадии строительства электрический тормаз мятнкового типа на 1200 PS и 700 ... 1800 об/мин. Наряду с поставкой многочисленных испытательных установок для высокого напряжения находится еще в работе опытная лаборатория высокого напряжения для одной известной фарфоровой фабрики. Эта лаборатория имеет между прочим трехфазный испытательный трансформатор на 1000 KVA для 2000 kV при последовательном и 660 kV при параллельном включении.

Кроме поименованных работ фирма AEG оказалась в состоянии принять на себя, а частью уже и выполнить интересные заказы на генераторные и распределительные установки, электровозы, измерительные и регулировочные аппараты для телеуправления, а равно на осветительную и иную электротехническую аппаратуру для домашнего хозяйства и производства.

2 ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРА

результат старательнейшей разработки.

Точность по классу 0,2



Астатический
ваттметр вели-
чайшей точности



Защищенные ампер-
вольтметры.

HARTMANN & BRAUN AG FRANKFURT/M, ГЕРМАНИЯ

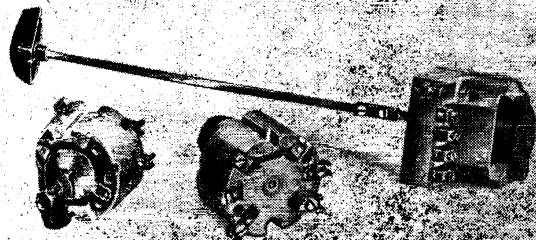
H&B



Выключатели всевозможных
типов для регулировки
электрического отопления

по нормам Союза Германских Электротех-
ников и иностранным техническим условиям

на 10, 15 и 25а для кухонных
плит и производственных
нагревательных приборов



Ernst Dreefs, Unterrodach (Oberfr.)

Основ. в 1903 г.

На выставке

(ГЕРМАНИЯ)

в Лейпциге дом „Электротехники“, Г 3

МАСЛООЧИСТИТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ГЕРИНГА

для

трансформаторного масла

турбинного масла

масла выключателей и т. п.

Нами уже поставлены сотни установок в СССР, начиная с самых простых фильтр-прессов и центрифуг и кончая самыми сложными вакуумными установками!

Кроме того:

- Масляные холодильники
- Маслоподогреватели
- Вакуумные пропиточные установки
- Вакуумные сушильные шкафы
- Установки для регенерации масла

Требуйте наши подробные проспекты!

Aktiengesellschaft

A. Hering, Nürnberg 2
(Abhofach)

Германия

8764

К Л Е Й Н Е В Е Ф Е Р С

ИГОЛЬЧАТЫЕ

экономайзеры

для использования тепла отходящих газов котельных установок для подогревания питательной воды.

ИГОЛЬЧАТЫЕ

воздухоподогреватели

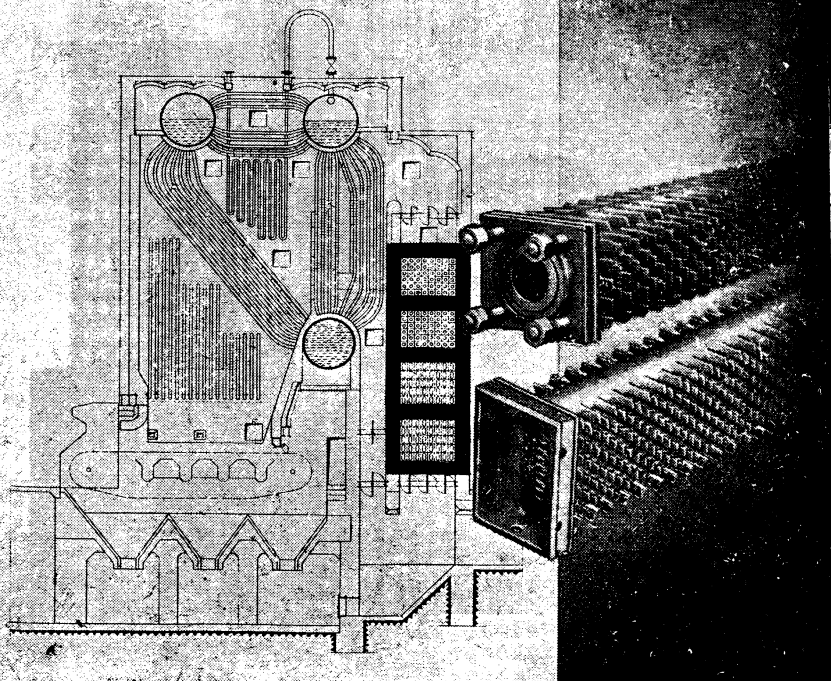
для использования тепла отходящих газов котельных установок для подогревания топочного воздуха.

Игольчатая поверхность нагрева зарекомендовала себя во многих тысячах установок.

Длина элемента до 3,5 м.

Обращайтесь к нам за советом во всех вопросах использования тепла отходящих газов.

Наши русские проспекты
R 40/576 и R 40/501



J. & P. KLEIWEFERS KREFELD / ГЕРМ.

ТЕЛЕФОН № 29145

Раньше: LIESEN & CO.

Адр. для тел.: ECOLUVO

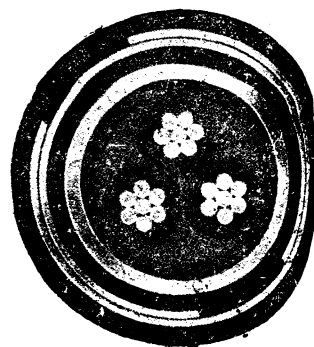
Берлинская контора: Berlin NW 87, Lessingstr. 25 · Телеф.: 39 36 06 / Венская контора: Wien 117, Peter-Jordanstr. 33 · Телеф.: A 13-0-52



**Для передачи
электрической энергии
любого напряжения
пользуйтесь
ПОДЗЕМНЫМИ КАБЕЛЯМИ**

производства

**ATELIERS DE CONSTRUCTIONS
ÉLECTRIQUES DE CHARLEROI**



Cablerie
Кабельный Завод



Charleroi
Шарлеруа - Бельгия

N. V. NEDERLANDSCHE KABELFABRIEK

DELFT (Голландия)



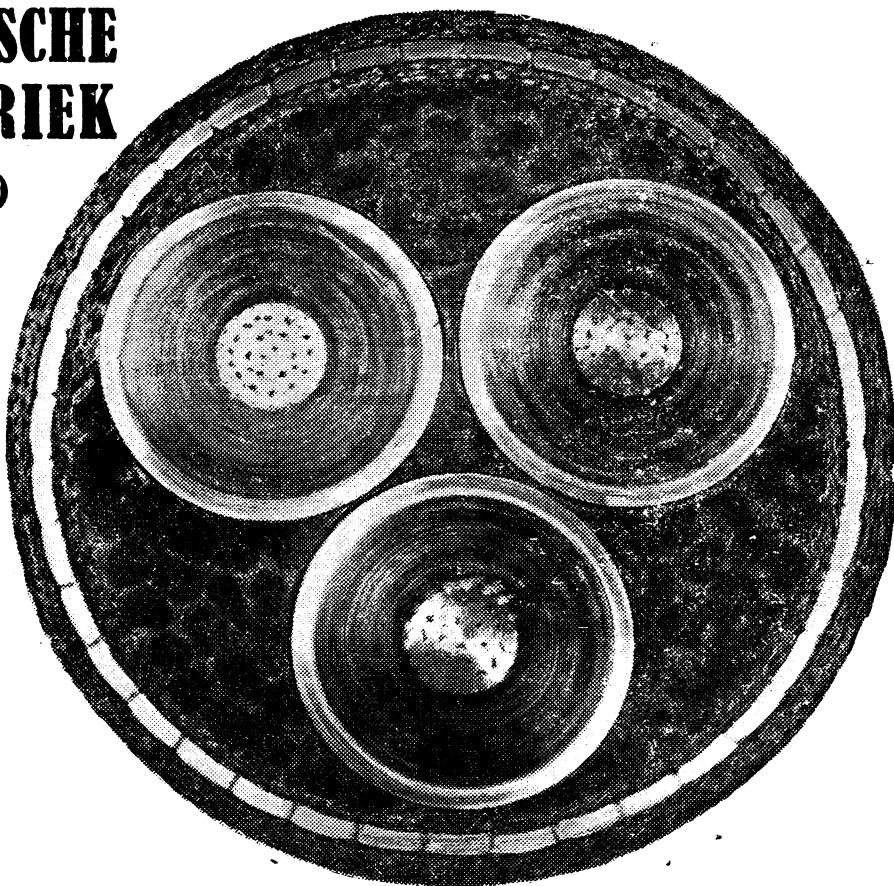
ПРОИЗВОДИТ:

Подземные электрические
кабели высокого и низкого
напряжения с бумажной
изоляцией

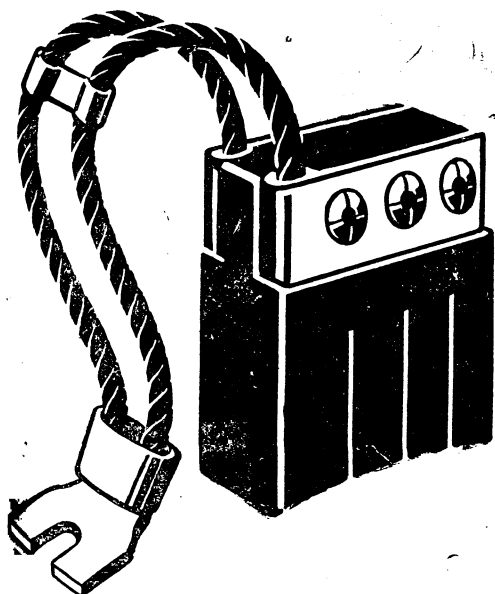
Подземные телефонные и
сигнализационные кабели

Подводные кабели

Неизолированную проволоку
и неизолированные кабели
из электролитическ. меди



RINGSDORFF



УГОЛЬНЫЕ ЩЕТКИ

НАША ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ПРОГРАММА
ОХВАТЫВАЕТ ЩЕТКИ ИЗ ТВЕРДОГО, ГРА-
ФИТНОГО, БРОНЗОВОГО И ОБЛАГОРО-
ЖЕННОГО УГЛЯ РАЗЛИЧНЕЙШЕГО КА-
ЧЕСТВА. МЫ ИМЕЕМ, БЛАГОДАРЯ ЭТОМУ,
ВОЗМОЖНОСТЬ ПОСТАВИТЬ НА ЛЮБУЮ
МАШИНУ ПОДХОДЯЩИЕ К НЕЙ ЩЕТКИ.

6769

RINGSDORFF-WERKE K.G. • MEHLEM-RHEIN (Германия)

заграничных товаров может последовать лишь на основании действующих в СССР правил о монополии внешней торговли.

INREKLAMA

Moskau, Kusnezki Most, 18/7

INREKLAMA

empfängt Anzeigen in alle
in der UdSSR erscheinenden
Fachzeitschriften.

INREKLAMA

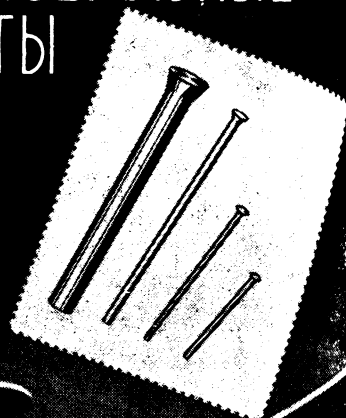
hat Vertretungen in allen
Ländern.

INREKLAMA

hat in Deutschland eine
einzige rechtmässige Firma
A. Göbel: Berlin — Wilmers-
dorf, Hohenzollerndamm 193
(Ecke Pfalzburgerstr.)

ПЕРФОРАЦИОННЫЕ И ШТАМПОВАЛЬНЫЕ ШТИФТЫ

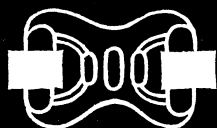
для
металла
бумаги
и т.п.



SCHUMAG
AACHEN
Германия

ПО НАУЧНЫМ МЕТОДАМ

мы испытываем наши угольные щетки для
мощных машин. Наше производство специа-
лизировано в этой области уже десятки лет.
Поэтому мы ручаемся за долговечность и
величайшую производственную безопасность.



SCHUNK & EBE
GIESSEN-Германия



Аппараты дистанционного управления Клекнера
преодолевают время и пространство

F. KLÖCKNER K.-G. KÖLN-BAYENTHAL

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МОСКВА, проезд Владимирова, 4.

ВЫШЛИ ИЗ ПЕЧАТИ

(июнь—июль)

ГОРДОН И. Л.— Водоприготовление в тепло-энергетическом хозяйстве. Утв. ГУУЗ НКЭП СССР в качестве учебного пособия для втузов. М.—Л., Госэнергоиздат, 1940 г., стр. 250, ц. 12 р. 50 к. в перепл., тираж 3 000.

ИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ (органические диэлектрики). Труды ВЭИ, вып. 38. М.—Л., Госэнергоиздат, 1940 г., стр. 111, ц. 4 р. 50 к., тираж 1 000.

ИНСТРУКЦИЯ ПО УСТРОЙСТВУ и обслуживанию паровых котлов (НКЭС СССР, Технический совет, Типовые инструкции по эксплуатации энергетических систем, ХВ-09). М.—Л., Госэнергоиздат, 1940 г., стр. 39, ц. 1 р. 15 к., тираж 1 500.

ИНСТРУКЦИЯ по эксплуатации установок высокочастотной диспетчерской связи по линиям электропередачи, ч. I (НКЭС СССР. Типовые инструкции по эксплуатации энергетических систем, СО-13). М.—Л., Госэнергоиздат, 1940 г., стр. 154, ц. 6 руб., тираж 1 000.

ИОГАНСОН В. И.— Изучение реж. Оснрвы гидрометрических работ. Утв. ГУУЗ НКЭС СССР в качестве учебного пособия для курсов техминимума. М.—Л., Госэнергоиздат, 1940 г., стр. 135, ц. 4 р. 50 к. в перепл., тираж 3 000.

МАЙВАЛДОВ В. В., КАЗАНСКИЙ В. Е. и СПИРИДОНОВ В. Н.— Релейная защита. Изд. 2-е, перераб. и дополненное. Утв. ГУУЗ НКЭС СССР в качестве учебного пособия для курсов техминимума. М.—Л., Госэнергоиздат, 1940 г., стр. 279, ц. 7 руб. в перепл., тираж 6 000.

НКЭС СССР, ОРГРЭС— Формуляры по ремонту паровых турбин, М., Госэнергоиздат, 1940 г., 36 формуляров, ц. 20 руб. в папке, тираж 2 000.

ПРАВИЛА БЕЗОПАСНОСТИ при обслуживании и ремонте оборудования для персонала тепловых цехов электрических станций. Издание 2-е, стереотипное (НКЭС СССР, Типовые инструкции по эксплуатации энерге-

тических систем). М.—Л., Госэнергоиздат, 1940 г., стр. 86, ц. 3 р. 70 к. в перепл., тираж 3 000.

СБОРНИК ИНСТРУКЦИЙ для котельных цехов электростанций. Вып. I. Должностные инструкции (НКЭС СССР, Технический совет. Типовые инструкции по эксплуатации энергетических систем). М.—Л., Госэнергоиздат, 1940 г., стр. 199, ц. 6 р. 25 к., тираж 4 000.

СПРАВОЧНИК для поступающих во втузы Наркомата электростанций СССР и Наркомата электропромышленности СССР в 1940 г. М.—Л., Госэнергоиздат, 1940 г., стр. 63, ц. 1 р. 75 к., тираж 3 000.

СПРАВОЧНИК для поступающих в техникумы Наркомата электростанций СССР и Наркомата электропромышленности СССР в 1940 г. М.—Л., Госэнергоиздат, 1940 г., стр. 35, ц. 1 р. 25 к., тираж 4 000.

СПРАВОЧНИК НОРМ ВРЕМЕНИ на ремонтные работы оборудования электростанций и сетей. Вып. I. ОТДЕЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ РЕМОНТНЫХ РАБОТ (НКЭС СССР, ОРГРЭС). М.—Л., Госэнергоиздат, 1940 г., стр. 99, ц. 5 р. 75 к., тираж 3 500.

СПРАВОЧНИК НОРМ ВРЕМЕНИ на ремонтные работы оборудования электростанций и сетей. Вып. II. КОТЛОАГРЕГАТ (НКЭС СССР, ОРГРЭС). М.—Л., Госэнергоиздат, 1940 г., стр. 130, ц. 7 р. 25 к., тираж 2 500.

СПРАВОЧНИК НОРМ ВРЕМЕНИ на ремонтные работы оборудования электростанций и сетей. Вып. VIII. ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ (НКЭС СССР, ОРГРЭС). М.—Л., Госэнергоиздат, 1940 г., стр. 98, ц. 5 р. 30 к., тираж 1 500.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ИЗОЛЯЦИЯ— Сборник материалов, вып. III. Составлен под редакцией члена-корреспондента Академии наук СССР Б. М. Вула (отв. редактор) и В. С. Квашнина (НКЭП СССР—Главэлектромашпром). М.—Л., Госэнергоиздат, 1940 г., стр. 175, ц. 7 руб., тираж 1 000.

СПИРИДОНОВ— Реле и защита, серия из 12 учебных таблиц. Формат $62 \times 88\frac{1}{2}$ л., цена комплекта 24 руб., тираж 8 000.

ПЛАКАТЫ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ИНСТИТУТ ОХРАНЫ ТРУДА— А отключен ли масляный выключатель? Формат $62 \times 94\frac{1}{4}$, ц. 1 р. 25 к., тираж 6 000.

НОЯТОВ Ф. Г. Не загромождайте проезды по двору, подступы к зданиям и наружным пожарным лестницам. Формат $29 \times 105\frac{1}{8}$, бес-
платно, тираж 4 000.

НОЯТОВ Ф. Г.— При пожаре разверни пожарный рукав. Формат $29 \times 105\frac{1}{8}$, ц. 75 коп., тираж 4 000.

ОРГРЭС— Проверь отсутствие напряжения в установках 35 000 вольт специально приспособленным для этого индикатором. Формат $62 \times 94\frac{1}{4}$, ц. 1 р. 25 к., тираж 6 000.