621.3
Э-45
6/913.

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

5

1938

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЪЕДИНЕННОЕ НАУЧНО-ИЗДАТЕЛЬСТВО

21.3
45

КОММУНИЗМ ЕСТЬ СОВЕТСКАЯ ВЛАСТЬ
ПЛЮС ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ ВСЕЙ СТРАНЫ (Ленин)

Пролетарии всех стран, соединяйтесь!

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

5

ГОД ИЗДАНИЯ 59-й

1938
МАЙ

Журнал НАРКОМАТОВ ТЯЖЕЛОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И МАШИНОСТРОЕНИЯ И АКАДЕМИИ НАУК СССР.
Адрес редакции: Москва, Бол. Калужская, дом 67. Энергетический ин-т, 1 этаж, комн. 144, тел. В 5-32-79
Адрес для корреспонденции: Москва, Главный почтамт, почтовый ящик № 648

РЕЧЬ тов. СТАЛИНА

на приеме в Кремле работников высшей школы 17 мая 1938 г.

Товарищи!

Разрешите провозгласить тост за науку, за ее процветание, за здоровье людей науки.

За процветание науки, той науки, которая не отгораживается от народа, не держит себя вдали от народа, а готова служить народу, готова передать народу все завоевания науки, которая обслуживает народ не по принуждению, а добровольно, с охотой (аплодисменты).

За процветание науки, той науки, которая не дает своим старым и признанным руководителям самодовольно замыкаться в скорлупу кружков науки, в скорлупу монополистов науки, которая понимает смысл, значение, всесилие союза старых работников науки с молодыми работниками науки, которая добровольно и охотно открывает все двери науки молодым силам нашей страны и дает им возможность завоевать вершины науки, которая признает, что будущность принадлежит молодежи от науки (аплодисменты).

За процветание науки, той науки, люди которой, понимая силу и значение установившихся в науке традиций и умело используя их в интересах науки, все же не хотят быть рабами этих традиций, которая имеет смелость, решимость ломать старые традиции, нормы, установки, когда они становятся устарелыми, когда они превращаются в тормоз для движения вперед, и которая умеет создавать новые традиции, новые нормы, новые установки (аплодисменты).

Наука знает в своем развитии не мало мужественных людей, которые умели ломать старое и создавать новое, несмотря ни на какие препятствия, вопреки всему. Такие мужи науки, как Галилей, Дарвин и многие другие общеизвестны. Я хотел бы остановиться на одном из таких корифеев науки, который является вместе с тем величайшим человеком современности. Я имею в виду Ленина, нашего учителя, нашего воспитателя (аплодисменты). Вспомните 1917 год. На основании научного анализа общественного развития России, на основании научного анализа международного положения Ленин пришел тогда к выводу, что единственным выходом из положения является победа социализма в России. Это был более, чем неожиданный вывод для многих людей науки того времени. Плеханов, один из выдающихся людей науки, с презрением говорил тогда о Ленине, утверждая, что Ленин находится «в бреду». Другие, не менее известные люди науки, утверждали, что «Ленин сошел съума», что его следовало бы упрятать куда нибудь подальше. Против Ленина выли тогда все и всякие люди науки как против человека, разрушающего науку. Но Ленин не убоялся пойти против течения, против косности. И Ленин победил (аплодисменты).

Вот вам образец мужа науки, смело ведущего борьбу против устаревшей науки и прокладывающего дорогу для новой науки.

Бывает и так, что новые пути науки и техники прокладывают иногда не общеизвестные в науке люди, а совершенно неизвестные в научном мире люди, простые люди, практики, новаторы дела. Здесь за общим столом сидят товарищи Стаханов

ВОЛОГОДСКАЯ
ЧИТАЛЬНЫЙ ЗАЛ
Обл. Библиотека

и Папанин. Люди, неизвестные в научном мире, не имеющие ученых степеней, практики своего дела. Но кому неизвестно, что Стаханов и стахановцы в своей практической работе в области промышленности опрокинули существующие нормы, установленные известными людьми науки и техники, как устаревшие, и ввели новые нормы, соответствующие требованиям действительной науки и техники? Кому неизвестно, что Папанин и папанинцы в своей практической работе на дрейфующей льдине мимоходом, без особого труда, опрокинули старое представление об Арктике, как устаревшее, и установили новое, соответствующее требованиям действительной науки? Кто может отрицать, что Стаханов и Папанин являются новаторами в науке, людьми нашей передовой науки?

Вот какие еще бывают «чудеса» в науке.

Я говорил о науке. Но наука бывает всякая. Та наука, о которой я говорил, называется ПЕРЕДОВОЙ наукой.

За процветание нашей передовой науки!

За здоровье людей передовой науки!

За здоровье Ленина и ленинизма!

За здоровье Стаханова и стахановцев!

За здоровье Папанина и папанинцев! (аплодисменты).

Развитие высоковольтного аппаратостроения в СССР и электроизоляционная техника

Ю. В. Буткевич
ВЭИ

В СВЯЗИ с ростом напряжений электрических установок и одновременным повышением требований устойчивости работы высоковольтной аппаратуры перед промышленностью и исследовательскими лабораториями СССР выдвигается важная задача изыскания новых электроизоляционных материалов и усовершенствования старых.

Известно, что за границей ведутся большие исследовательские работы по изоляционным материалам.

При разрешении проблемы выключателестроения серьезную роль играли и продолжают играть изоляционные материалы. Главнейшими изоляционными материалами в масляных выключателях являются фарфор, бакелит и масло. *Осуществление выключателя на высокое напряжение невозможно без этих материалов.*

На рис. 1 показан 287-kV выключатель фирмы GEC в процессе монтажа. Выключатель этот установлен на станции Boulder Dam в Америке и является последним достижением в области выключателестроения [1]. Время действия его всего 0,05 sec, считая от подачи импульса на выключающую катушку до полного разрыва цепи. На рис. 1 показана одна фаза выключателя. В крайние колонки ее, заполненные маслом, встроены каскадные трансформаторы тока. Высота фарфора — около 2,5 m. Горизонтальные фарфоровые трубы несут в себе главную часть выключателя — дугогасящие устройства.

Для создания выключателя на 300—400 kV Куйбышевской гэс нужны будут фарфоровые изделия с внутренним диаметром около 850—900 mm и высотой до 4000—4500 mm, что потребует, вероятно, подготовки специальной производственной базы.

Особое значение фарфоровая изоляция приобретает также и в разъединителях. На рис. 2 дан эскиз спаренного 287-kV разъединителя и показаны его габариты [2]. Разъединитель на 400 kV потребует еще более высоких изоляторов. Большие моменты отключения и выключения, особенно при обледенении контактных частей, предъявляют серьезные требования к изоляторам в отношении механической прочности. Задача может быть разрешена или путем построения опорных изоляторов в виде труб, подобных опорным изоляторам выключателей, или при помощи комбинации более легких типов штыревых изоляторов с тем, чтобы получить в результате значительную механическую прочность колонн.

Большую роль в развитии мощных высоковольтных выключателей играет слоистый материал типа бакелита. Например, для выключателей на 400 kV потребуются бакелитовые цилиндры большого диаметра — 700 ÷ 750 mm — и большой длины — до 5000 mm. Можно в крайнем случае пойти на составные цилиндры, и, таким образом, в смысле размеров задача на первое время может быть разрешена. Но бакелитовые цилиндры завода «Изолит» до сего времени не отличались хорошим качеством. Бумага слишком сухая, легко расслаивается и набирает влагу. Бакелит такого качества можно еще применять под маслом, если он изготовлен достаточно тщательно и с увеличенным количеством лака, но на воздухе бакелит работает уже ненадежно.

Ряд иностранных фирм в своих выключателях, разъединителях мощности и других аппаратах, предназначенных для закрытых помещений, часто применяет для различных крепежных деталей и изолирующих тяг бакелит, гетинакс или текстолит, покрытый лаком после сборки (рис. 3). Этот материал позволяет осуществить надежные, простые и легкие механизмы. В наших условиях в свое время отказались от бакелитовых деталей на воздухе ввиду наблюдавшихся случаев перекрытия по поверхности и по слоям вследствие отсыревания материала. Однако *отказ от бакелита был принципиально неправилен.* Нужно было добиваться высококачественного бакелита, гетинакса или текстолита и лаковых покрытий для этих материалов. *Вопрос относительно применения бакелита и текстолита для аппаратов внутренних установок сохранил полную актуальность и должен быть также окончательно решен.* В ряде случаев фарфор не может заменить полноценно эти материалы как по достижимым размерам деталей из него, так и надежности, особенно в условиях значительных механических толчков, которые испытывают трубки предохранителей, тяги выключателей, разъединителей мощности и т. п.

Особо важное значение в связи с применением бакелита и текстолита для изолирующих деталей, не погруженных в масло, приобретает их лаковое покрытие. *Вопросу о лаковых покрытиях для защиты от влагопоглощаемости уделяется совершенно недостаточное внимание.* Опыт заграничной эксплоатации показывает, что бакелит и текстолит при условии хорошего лакового покрова работают весьма надежно.

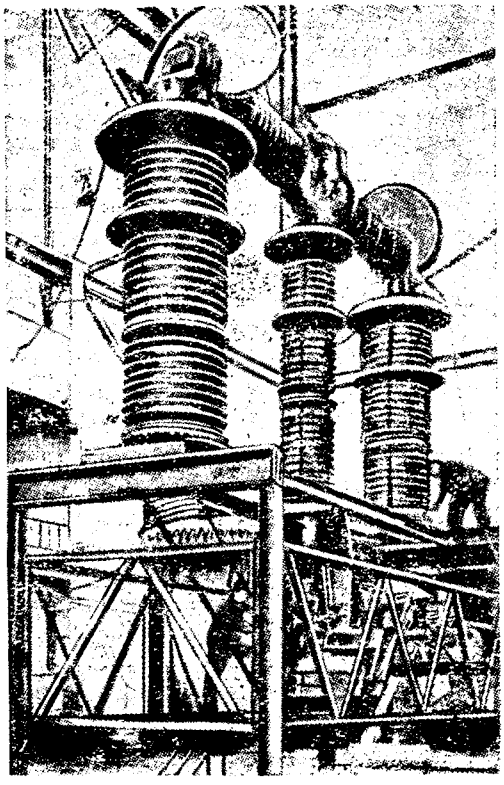


Рис. 1

Мы ранее упоминали о том, что наш бакелит можно применять под маслом, однако необходимо подчеркнуть, что исследовательских работ по *определению напряжений скользящего разряда вдоль бакелитовых цилиндров под маслом для высоких напряжений у нас не ведется.* Это положение нельзя признать нормальным. В связи с решением задачи выключателя на 300—400 kV *разрядные напряжения вдоль бакелитовых цилиндров под маслом при промышленной частоте, а также при импульсах должны быть изучены,* и данные эти должны являться одной из основных характеристик бакелита. Между тем завод «Изолит» мало интересуется качеством своей продукции.

Исключительно большое значение в аппаратостроении приобретает вопрос о минеральных маслах для заполнения аппаратов. Масло может служить или только для целей изоляции, или для изоляции и одновременно для охлаждения токоведущих элементов, или, наконец, для изоляции и одновременно для гашения дуги в выключающих аппаратах.

Во всех случаях желательно стремиться получить масло с высокой электрической прочностью и низкой температурой застывания или с незначительным повышением вязкости при значительном понижении температуры. Особенно важно сохранение незначительной вязкости при низких температурах для масел, применяющихся для заполнения дугогасящих систем выключателей. Действительно, теперь особое внимание начинают приобретать выключатели с «масляным дутьем», у которых масло под давлением подается в об-

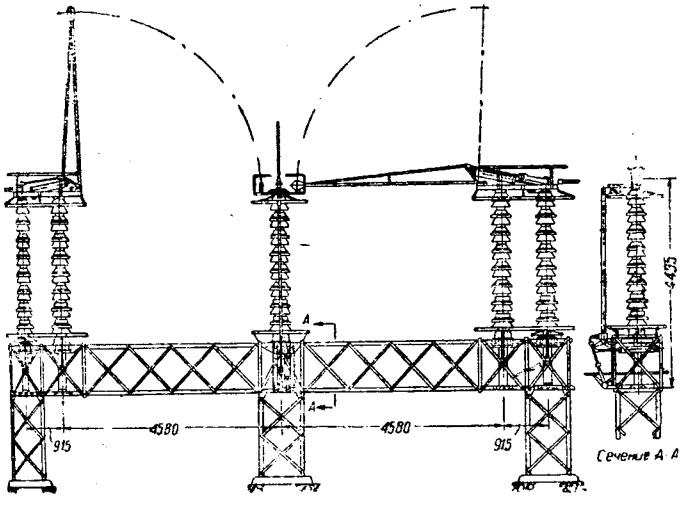


Рис. 2

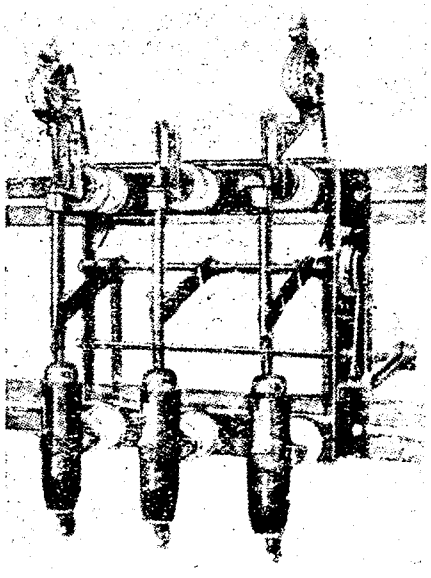


Рис. 3

ласть, где горит дуга. В этом процессе играет очень большую роль скорость вытекания масла и, очевидно, важно, чтобы вязкость масла не поднималась выше известного предела.

Вторая важная особенность минерального масла, применяемого для заполнения масляных выключателей, это — малая склонность к копотеобразованию. На практике были отмечены многочисленные случаи перекрытия изоляции в масляных выключателях под маслом. Наиболее вероятной причиной таких аварий является отложение копоти, образующейся в масле под действием дуги.

Работами ВЭИ было установлено, что можно получить путем отгонок некоторых фракций масло с температурой замерзания —60°, что уже приближает его к лучшим сортам масел, применяющихся за границей для малообъемных выключателей [3]. В ВЭИ начаты также работы по выяснению склонности отдельных сортов масла к копотеобразованию под действием дуги. Сейчас уже очевидно, что количество копоти сильно зависит от марки масла.

В дальнейшем совершенно необходимо продолжить работы по изысканию масел, замерзающих при более низкой температуре. Собственно температура замерзания —60° была бы приемлема, если бы вязкость для этих сортов масел не повышалась так резко. Вязкость их значительно повышается при —35°, и для малообъемных выключателей с масляным дутьем они могут оказаться малопригодными. Важно также установить, как будут действовать получающиеся морозостойкие масла с точки зрения гашения дуги и копотеобразования. Необходимы дальнейшие исследования более комплексного характера, определяющие всесторонне характеристики масел с низкой температурой застывания, получаемых для масляных малообъемных выключателей. Особую актуальность вопрос о выборе масла представит для выключателей 300—400 kV Куйбышевского гидроузла.

Кроме масла, для высоковольтной аппаратуры существенно важны также и другие изолирующие жидкости. За границей ведутся в настоящее время работы по подбору негорючих жидкостей для гашения дуги. Особо следует отметить последнюю статью Fr. Kesselring [4], где дается сравнение различных жидкостей по их воздействию на дугу и с точки зрения взрывобезопасности. За границей за последние годы получила довольно широкое распространение как дугогасительная жидкость — вода. Но обычная чистая вода не может считаться вполне удовлетворительным материалом для заполнения камер выключателей. Прежде всего вода обладает слишком высокой температурой замерзания, и поэтому выключатели с чистой водой могут применяться в помещениях, где температура никогда не падает ниже нуля. Там же, где температура может падать ниже нуля, применяется вода со специальными добавками в виде глицерина, спирта и др. Путем добавок снижают температуру застывания смеси ниже нуля на 10—12°. Получение жидкости с водой в качестве основы представляет несомненный интерес. Особое значение приобретает этот вопрос в связи с выключателем для Дворца Советов и подобных сооружений, где требуется особая безопасность в эксплоатации.

Весьма важное значение для развития ряда аппаратов имеет дальнейшее совершенствование твердых газогенерирующих материалов. Насегодня мы знаем из таких материалов только фибру и прессованную борную кислоту. Наиболее широкое распространение эти материалы получили в высоковольтных плавких предохранителях и разрядниках стреляющего типа. От свойств фибры в сильной степени зависит качество этих аппаратов и, в частности, число повторных отключений без смены материала. За границей делаются попытки найти более совершенный, чем фибра, материал для гашения дуги в предохранителях и разрядниках. О. Маут [5] описывает разъединители мощности, т. е. уже небольшие выключатели, у которых дугогасящая часть основана на принципе стреляющего фибрового предохранителя. В них использован «hartgummi» — материал, позволяющий отключать номинальные токи (300—100 А) несколько сотен раз без смены трубки.

Действие твердых газогенерирующих материалов основано на разложении дугой стенок трубки, которая сделана из подобных материалов. Выделяющиеся газы с силой выбрасываются из трубки, производя деионизацию дугового столба. Известно, что особенно благоприятное действие на гашение дуги оказывают газы, богатые содержанием водорода. Безусловно можно найти вещества, обладающие высокими изолирующими свойствами и в то же время дающие большое количество газов, способствующих гашению дуги. Возможно, что пропитка даже обычной фибры какими-либо кислотами могла бы повести к значительному повышению активности ее действия. Фирма AEG сделала попытку построить 10-kV выключатель с гашением дуги мощностью 100 MVA от разложения твердого диэлектрика [6]. У нас такие работы по материалам вовсе не ведутся, а между тем они могли бы сослужить большую службу в развитии высоковольтных аппаратов как для выключения, так и защиты от перенапряжений. Мы считаем своим долгом *категорически настаивать на развитии у нас работ в этом направлении*, учитывая их большое значение для высоковольтного аппаратостроения.

Что собственно здесь требуется?

Во-первых, необходимо найти такой твердый диэлектрик, который, разлагаясь под действием дуги, выделял бы газы, благоприятно действующие на гашение дуги,— в первую очередь водород, водяной пар или углекислый газ. Наилучшими дугогасящими свойствами обладает водород.

Во-вторых, это должен быть такой материал, который, разлагаясь под действием высокой температуры дуги, сохранял бы довольно хорошие изоляционные свойства по поверхности.

В-третьих, этот материал должен сохранять многократно повторное действие как дугогаситель, т. е. чтобы от раза к разу выделение газа не падало бы слишком резко.

Необходимо отметить значение, которое приобретает применение в аппаратостроении пластических масс. Не говоря уже о том, что пластические массы совершенно недостаточно внедряются у нас в области вспомогательной аппаратуры (рукоятки, кнопки и т. п.), следует отметить

совершенное отсутствие попыток использования пластмасс для дугогасительных камер масляных выключателей. Особый интерес представляет использование таких масс для камер водяных выключателей, где материалы типа бакелита и текстолита не могут быть применены, так как, работая в присутствии влаги, они быстро теряют свои изолирующие и механические свойства.

Недостаточное внимание у нас до сего времени уделялось материалам для контактов электрических аппаратов. В этой области можно поставить две основные задачи: 1) использование уже известных контактных металлов и 2) изыскание новых сплавов, устойчивых в отношении дуги и дающих низкое переходное сопротивление.

В заграничной практике уже широко применяется серебрение контактов как мера, повышающая пропускную способность контактов при номинальном режиме и устойчивость контактов в отношении сваривания при режиме к. з. В нашей практике делаются пока еще робкие попытки серебрения контактов, хотя совершенно очевидно, что это мероприятие экономически безусловно целесообразно. В ряде случаев удается добиться значительной экономии меди, нанося чрезвычайно тонкий слой серебра на контакт.

Известно, что применение сплавов тугоплавких металлов дает возможность значительно повысить устойчивость контактов при воздействии дуги. Для особо ответственных выключателей это очень важно с точки зрения износа контактов. В этом направлении у нас также совершенно недостаточно развиты работы. Ведутся в ВЭИ работы по контактам для малых токов (регуляторов, магнето и т. п.). Для больших же токов с мощными дугами износ электродов почти совершенно не изучается. Вопрос износа контактов (электродов) весьма существенен и для дуговых выпрямителей высокого давления. Сейчас эти работы начаты в ВЭИ, но масштаб их совершенно недостаточен. За границей же вопросу износа и переноса металла в контактах уделяется очень большое внимание. Достаточно указать на целую серию работ Holm за 1936 и 1937 гг. Весьма интересна работа Kirschstein по износу электродов зависимости от состава газа [7]. Известно, что фирмы MV и GEC начинают широко применять в своих выключателях дугостойкие сплавы, состав которых нам известен лишь приблизительно.

Можно было бы указать ряд других материалов, имеющих не меньшее значение для развития высоковольтного аппаратостроения. Скажем, например, относительно высококачественных картонов, которые у нас почти не производятся, прокладочной и, особенно, маслоупорной резины и т. п.

Не снимается вопрос относительно дальнейшего изучения дерева как изоляционного материала.

Главэлектропром и находящиеся в его ведении заводы очень слабо работают в области электроизоляционных материалов и не проявляют нужной инициативы. Исследовательские базы слабы, и некоторые направления работ, в частности, те, которые имеют значение для коммутационной аппаратуры, вовсе отсутствуют.

Такое отставание техники электроизоляционных материалов, создавшееся в результате вредительской деятельности в электропромышленности троцкистско-бухаринских агентов фашизма, явно тормозит высоковольтное аппаратостроение и тем самым тормозит развитие электрификации СССР, что не может быть терпимо.

Это отставание одного из ведущих участков советской электропромышленности должно быть преодолено в кратчайший срок.

Литература

1. Prince, Circuit Breakers for Boulder Dam. El Engng. 1935, апрель, S. 366.
2. Bovie and Garmann, 287-kV Boulder Dam Disconnecting Switches. El. Engng. 1936, июнь.
3. F. Kesselring, Ist der Expansionschalter berufen, den ölschalter zu ersetzen?. Siem. Z. № 2, 1932.
4. F. Kesselring, Nicht brennbares Öl der Wasserschaltflussigkeit. VDE Fachberichte, 1936.
5. O. Mayr, Ein neuer Leistungstrennschalter, ETZ, H. 44, 1935, S. 1189.
6. Übermuth, Forischritte im Druckgasschalterbau, AEG Mitt № 3, 1937.
7. Kirschstein, Über Abbrandversuche an Lichtbogen in einem Gemisch von Luft und Stickstoff. Wiss. Verof. Siem. Konz. B. XVI, 1937, 1 Heft.

ОТ РЕДАКЦИИ

В ряду электротехнических проблем, возникающих в связи с подготовкой к проектированию будущих сверхдальних и сверхмощных электропередач СССР, подобных линии Куйбышев – Москва, важное место должна занять разработка проблемы передачи энергии постоянным током высокого напряжения. Масштаб этой проблемы соответствует возможностям только нашего социалистического государства.

Ниже мы помещаем в порядке обсуждения статью инж. Я. М. Червоненкиса „Возможности передачи энергии Куйбышевской гэс постоянным током высокого напряжения" и мнения по этому вопросу чл.-корр. Академии наук СССР проф. К. А. Круг, акад. А. А. Чернышева, проф. А. А. Горева, инж. В. Г. Бирюкова, инж. С. М. Брагина и проф. С. А. Кукель-Краевского.

Возможности передачи энергии Куйбышевской гэс постоянным током высокого напряжения[1]

Я. М. Червоненкис
Гидроэнергопроект

В СВЯЗИ со строительством Куйбышевского гидроузла, большой технический интерес представляет проблема передачи энергии Куйбышевского гидроузла в отдаленные районы. В частности, передача Куйбышев — Москва (600 MW, 850 km) по своему моменту (длина × × мощность) более чем в 4 раза превосходит крупнейшую существующую линию в мире — Болдер Дам — Лос Анжелос (США).

Согласно схематическому проекту, составленному Ленгидэпом под руководством проф. Горева, для обеспечения устойчивости такой сверхмощной передачи без применения особых методов компенсации требуются четыре 300-kV цепи трехфазного тока, работающие по блочной схеме [1]. Суммарная стоимость такой линии равна 400 млн. руб., себестоимость передачи 1 kWh — 1,71 коп., или 350% от себестоимости энергии на шинах гэс.

Были произведены попытки улучшить показатели передачи повышением напряжения до 400 kV. При этом напряжении по условиям устойчивости нагрузки блочная схема неприменима. Наиболее современное решение при напряжении 400 kV,— 2-цепную передачу с 4-мя переключательными постами,— предложил ВЭИ. Однако, несмотря на применение новейших методов повышения устойчивости, добиться снижения капитальных затрат и себестоимости передачи по сравнению с блочным 300-kV вариантом не удалось. Ряд инженеров предложил прибегнуть к более энергичным средствам повышения пропускной способности линий[2].

Все предложенные решения стремятся повысить надежность и эффективность передачи, более или менее приближая устойчивость и режим напряжения линии к параметрам линии передачи постоянным током высокого напряжения. Не подлежит, однако, сомнению, что ни одно из них не дает столь радикального разрешения проблем статической и динамической устойчивости, перенапряжений и снижения себестоимости, как переход на передачу постоянным током, столь рекомендованный большинством авторов для сверхмощных и сверхдальних линий энергопередачи.

В целях выяснения возможности и целесообразности применения подобной передачи для использования энергии Куйбышевского гидроузла, Московское бюро электротехнических сооружений треста Гидроэнергопроект произвело ориентировочные подсчеты линий постоянного тока Куйбышев—Москва, Куйбышев—Урал и др. для различных напряжений и схем преобразования.

Произведенные подсчеты позволяют сделать следующие выводы.

Передача мощности 600 MW на расстояние 850 km постоянным током высокого напряжения при современном уровне развития техники принципиально осуществима.

Постоянный ток напряжения порядка 2 × 250 kV может быть получен путем выпрямления трехфазного тока нормальных генераторов и вновь преобразован в трехфазный ток на приемном конце.

Применение постоянного тока бесспорно технически и экономически целесообразно для трех сверхдальних линий передачи Куйбышев—Москва, Куйбышев—Урал и Куйбышев—Горький (табл. 1). Более короткие линии, в том числе линия Куйбышев—Ирригация, могут быть не менее экономично выполнены на трехфазном токе.

Для осуществления передачи постоянным током необходима так же, как и для других решений, упомянутых выше, аппаратура, по существу не новая, но нигде в мире не изготовляемая в тех масштабах, которые требуются для Куйбышевской гэс. Необходима предварительная проработка ряда инженерных и научно-исследовательских проблем, а также длительная предварительная проверка окончательно принятой схемы в реальных эксплоатационных условиях. Поэтому, принимая во внимание чрезвычайно сжатые сроки строительства гэс, осуществление передачи постоянным током первой очереди гэс к 1944 г. представляется сомнительным. Срок до ввода второй очереди достаточен для разрешения всех возникающих трудностей при условии начала работ в 1938 г.[3].

---

[1] См. также дискуссию об электропередаче Куйбышев—Москва, „Электричество", № 4, 1938.

[2] Продольная компенсация линии посредством сериесных асинхронных компенсаторов (д-р Брук [3]); передача энергии гэс при пониженной частоте в 16 $^2/_3$ Hz, что дает трехкратное снижение реактивности линии (акад. Шенфер); включение в линию сериесных статических конденсаторов, полностью компенсирующих ее реактивность, и шунтовых реакторов, компенсирующих ее емкость (проф. Горев).

[3] Указанному двухступенчатому варианту основного проекта еще в стадии эскизного проектирования противопоставлялся вариант последовательного ввода всей мощности гэс на приплотинной станции. В случае принятия такого варианта разбивка на 2 очереди отпадает для строительства самой гэс, но, очевидно, остается для линий передачи. Срок ввода линий в этом варианте несколько отодвигается, что облегчает практическую реализацию передачи постоянным током для Куйбышевской гэс.

Таблица 1

300-kV линии Куйбышевской гэс (по схематическому проекту)

№ п/п	Приемный конец линии	Длина km	1944 г.		1947 г.		Схема передачи	Число переключ. пунктов
			число цепей	отправляемая мощность	число цепей	отправляемая мощность [1]		
1	Москва	850	2	300	4	600	Блочная	—
2	Урал	700	2	290	3	440	Связанная	2
3	Горький	500	1	150	2	250	»	2
4	Ирригация	175	1	200—300	2	500—600	»	0

[1] По новейшим данным, возможно, по линии Куйбышев — Москва будет передаваться мощность до 800—1000 MW.

Таблица 2

№ п/п	Схема питания	Линейное напряжение kV	Средний линейный ток A	Питающие трансформаторы (трехфазные)			Вентили (однофазные)			
				число	напряжение kV	суммарная мощность MVA	число	эффективн. ток A	максимальный ток A	обратное напряжение kV_{max}
1	Двойная звезда	2×250	640	2	310	279	6	260	670	522
2	То же, с катушкой Кюблера	2×250	640	2	358	223	6	180	335	547
3	Трехфазная Греца	2×250	640	1	182	165	6	360	670	261
4	То же	2×290	552	1	211	165	6	310	580	310

Если эксплоатационная проверка передачи постоянным током даст положительные результаты, можно будет добиться необходимого при пуске второй очереди гэс удвоения пропускной способности основных линий не сооружением новых цепей, а переводом трехфазных линий первой очереди на постоянный ток с одновременным повышением действующего значения напряжения в отношении $\sqrt{2}:1$. При этом оборудованы для работы на линию постоянного тока будут в основном только агрегаты второй очереди гэс.

Схема передачи постоянным током. В основу подсчетов положена передача, использующая обе полярности, с заземленной нейтралью (рис. 1). Каждое выпрямительное устройство, состоящее из повышающего трансформатора и 6-фазного выпрямителя, соединено одним полюсом с линейным проводом, а второй полюс его заземлен наглухо. Напряжение между проводом и землей, таким образом, примерно, равно амплитудному напряжению трансформатора; напряжение между двумя проводами — вдвое больше. Мощность выпрямителя принята равной предполагаемой мощности генератора [4], около 160 MW.

На приемном конце таким же образом включены преобразовательные устройства, состоящие из 6-фазного инвертора и понижающего трансформатора.

Каждое выпрямительное и преобразовательное устройство защищено с низкой стороны трансформатора масляным выключателем. С высокой стороны силовые выключатели излишни, так как включение и отключение линии производятся зажиганием и запиранием выпрямителей, а переключения — разъединителями при обесточенной линии.

Повышающие трансформаторы. Сравнение различных схем питания выпрямителя с использованием обеих полярностей приведено в табл. 2.

Лучшие результаты дает схема Греца (рис. 1), обеспечивающая отличное использование трансформаторов и вентилей и минимальное обратное напряжение. При сравнении напряжения трансформаторов в различных схемах необходимо учесть, что схемы 1 и 2 позволяют выполнить трансформаторы с глухим заземлением нейтрали, а схемы 3 и 4 требуют изолированной нейтрали.

В период максимальной нагрузки в Поволжье часть агрегатов, нормально питающих линии дальнепередачи, должна переключаться на шины 220 kV, питающие более близких потребителей. Для этой цели следует рассчитать часть трансформаторов, питающих выпрямители по схеме 3 или 4, на 220 kV, снабдив их соответствующими отпайками [5].

При одинаковых требованиях к реактивности такой трансформатор будет согласно предварительным данным завода по габаритам и стоимости примерно равноценен трансформатору 300 kV той же мощности с заземленной нейтралью.

Повышение реактивности до 15—16% позволит чувствительно снизить габариты и стоимость трансформатора.

Питающие трансформаторы будут подвергнуты

[4] В случае применения генераторов 195 MW мощность выпрямителей следует соответственно увеличить.

[5] На переменном токе такая переброска может быть реально обеспечена только установкой двух отдельных 220 и 300-kV трансформаторов на каждом из соответствующих генераторов.

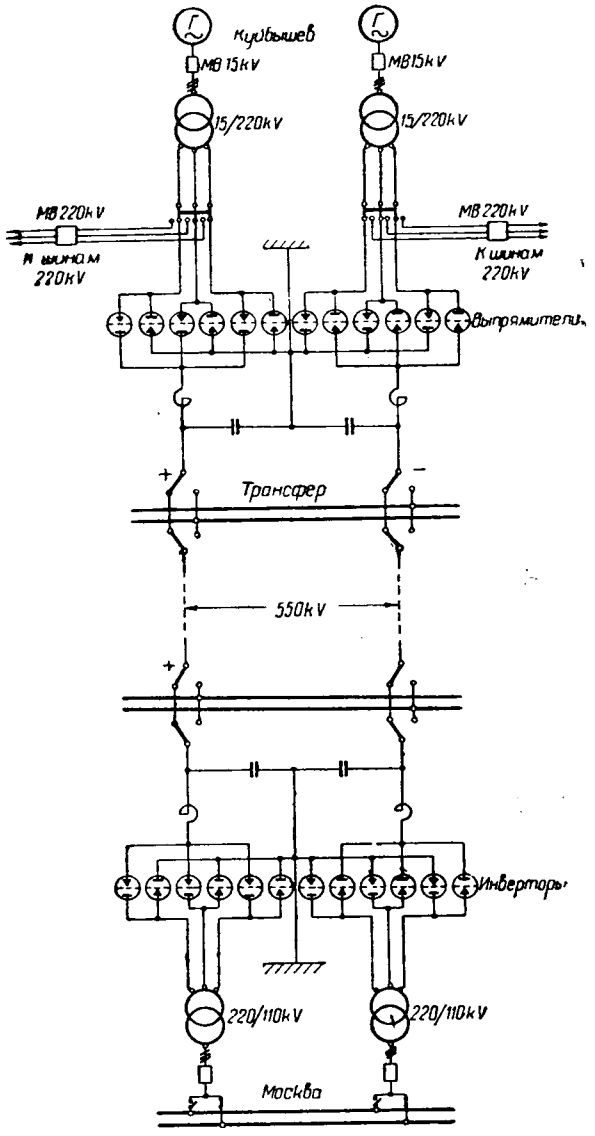


Рис. 1. Принципиальная упрощенная схема линии передачи постоянного тока Куйбышев—Москва (с возможностью переключения агрегатов на шины 220 kV переменного тока станции)

меньшим перенапряжениям, чем обычно (см. ниже). Механические усилия на обмотки при к. з. будут, наоборот, выше обычных.

Выпрямители. Среди выпрямителей и инверторов, пригодных для передачи энергии постоянным током, наиболее проверенными на практике являются управляемые вентили с ртутным катодом, в течение многих лет применяемые в электротяге как для выпрямления, так и для инвертирования больших мощностей. В настоящее время ртутные выпрямители мощностью тока в пределах менее 10 MW строятся на 50 kV выпрямленного напряжения в 6-фазной схеме, что соответствует максимальному запирающему напряжению в 110 kV. Несмотря на быстрый рост мощностей и напряжений этих выпрямителей, ртутные выпрямители достаточного напряжения и мощности для выпрямления энергии Куйбышевской гэс смогут быть в течение ближайших лет, очевидно, осуществлены только посредством последовательного включения ряда однофазных вентилей. Равномерное распределение обратного напряжения между вентилями может быть обеспечено емкостными делителями, например, наподобие емкостных трансформаторов напряжения Вестингауза. Осуществимость такого решения не подлежит сомнению; схема надежна в отношении обратных зажиганий, но сравнительно громоздка и не может быть поэтому принята в качестве основного варианта.

Лучшее решение обещает дать дуговой вентиль (рис. 2) проф. Э. Маркса [4]. Вентиль состоит из двух медных электродов, обдуваемых сильным потоком инертного газа. Один раз в период питающей частоты к вспомогательным электродам, расположенным на весьма небольшом расстоянии от главных, кратковременно подводится зажигающее напряжение. Возникающая дуга газовым потоком переносится на главные электроды. Чтобы избежать перегрева этих электродов, горящей дуге сообщается быстрое вращательное движение посредством постоянных магнитов. В момент прохода тока в дуге через нуль дуга гаснет, и пространство между электродами деионизируется газовым потоком: вентиль запирается вплоть до подачи следующего зажигающего импульса.

Изобретателем были построены вентили на токи в несколько тысяч ампер и — при меньших токах — на запирающие напряжения до 700 kV. Испытания вентиля на 180 kV, 170 A показали, что в отличие от других типов выпрямителей при увеличении тока запирающее напряжение не снижается, если температура электродов поддерживается постоянной [5]. Это обстоятельство, объясняющееся быстрой и принудительной деионизацией вентиля, позволяет сравнительно легко построить сверхвысоковольтные дуговые выпрямители большой мощности.

Срок службы вентиля по мнению Маркса «практически не ограничен» [18]. Износу подвержены только наконечники электродов, которые должны меняться примерно один раз в месяц.

Несмотря на заявление изобретателя, что лабораторная разработка промышленного типа дуговых вентилей была завершена в 1936 г. и на благоприятные результаты испытания однофазного выпрямителя 360 kV, 300 A на подстанции Чорневиц [6], эти вентили пока не получили промыш-

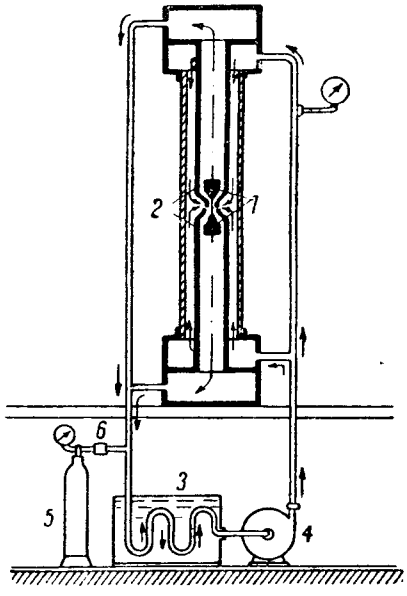


Рис. 2. Схема вентиля Маркса с замкнутой циркуляцией газа:
1 — главные электроды; *2* — вспомогательные электроды; *3* — охладитель; *4* — вентилятор; *5* — баллон высокого давления с инертным газом (гелий или аргон); *6* — регулятор давления

ленного применения. Это объясняется, очевидно, тем, что существующие на западе линии электропередачи ни по своей длине ни по своей мощности не требуют перехода на передачу постоянным током, другие же промышленные потребители силовых выпрямителей не нуждаются в столь высоких напряжениях и мощностях.

В СССР работы по дуговым выпрямителям ведутся с 1937 г. В ВЭИ в настоящее время построен и испытывается макет вентиля Маркса, рассчитанный на 65 А эффективных и на запирающее напряжение порядка 100 kV. Первые испытания — при низком напряжении — дали относительно благоприятные результаты. В текущем году там же строится трехфазный выпрямитель Маркса на 200 А при запирающем напряжении 200 kV. По заявлению работников ВЭИ дуговые вентили на несколько сот ампер и на обратное напряжение порядка 300 kV, требуемые для передачи энергии Куйбышевской гэс, могут быть при надлежащей форсировке темпов работы освоены нашей промышленностью в текущей пятилетке. Параллельно необходимо вести разработку однофазных высоковольтных вентилей с ртутным катодом, в частности, типа игнайтрона.

Таблица 3

Ориентировочные параметры 160-MW вентиля Маркса для куйбышевских линий передачи напряжением $U_l = 265$ до 290 kV постоянного тока

№ п/п	Параметр	Величина	Обоснование
1	Максимальное рабочее обратное напряжение U_0 в kV	275 до 310	1,045 U_l
2	Запирающее напряжение U_s в kV	$\geqslant 460$	$\geqslant 1{,}5\ U_0$
3	Максимальный ток I в A	650	$1{,}045\ \frac{P}{U_l}$
4	Эффективный ток I_{eff} в A	355	$0{,}948\ \frac{I_{max}}{\sqrt{3}}$
5	Расстояние между главными электродами a в mm	20	Эмпирич.
6	Давление в вентиле p в at	9—10	$\frac{U_s}{2{,}5\ a}$
7	Расход воздуха при полной нагрузке Q в m³/sec	70	$3 + 0{,}1\ I_{max}$
8	Падение в дуге ΔU в V	200—250	Эмпирич.
9	К. п. д. вентиля η (без вспомогательного оборудования) в %	99,8	$\frac{U_l - 2\Delta U}{U_l}$

Фильтр. Для сглаживания высших гармоник на стороне постоянного тока следует применить контур из емкостей и самоиндукций, схематически показанный на рис. 1. Помимо своего основного назначения, контур является эффективной защитой оборудования подстанции от атмосферных перенапряжений. Действительно, как показал опыт эксплоатации линий постоянного тока системы Тюри, высокочастотные перенапряжения не могут проникнуть через дроссель и стекают через емкость в землю. Установка сглаживающего контура не исключает, однако, применения обычных видов защиты от перенапряжений.

Линия. Для передачи энергии на постоянном токе можно использовать как воздушную линию, так и подземный кабель. В обоих случаях лучшее использование изоляции позволяет намного повысить линейное напряжение, а следовательно, и передаваемую мощность.

Эксплоатационное напряжение воздушной линии определяется, помимо уровня изоляции, критическим напряжением коронирования линейных проводов. Как показали опыты Брауншвейгского высоковольтного института, отрицательный провод линии постоянного тока дает примерно те же потери на корону, как провод переменного тока того же диаметра, имеющий по отношению к земле то же амплитудное напряжение; положительный провод коронирует лишь при напряжении [7], повышенном на 20—30%. Коэффициент повышения эффективного напряжения равен, таким образом, в первом случае примерно 1,41, во втором — 1,7 ÷ 1,8.

В высоковольтном институте Берлинской высшей школы для определения условий работы линии постоянного тока были произведены исследования напряжения перекрытия 25-kV изоляторов различной формы при переменном и постоянном напряжении [8]. Выяснилось, что отношение постоянного напряжения перекрытия к переменному (эффективное значение) равно при положительной полярности 1,55 до 1,79, для отрицательной полярности даже 1,8 до 2,45. Таким образом даже при положительной полярности напряжение перекрытия на постоянном токе выше амплитудного значения напряжения перекрытия на переменном токе. Этот факт объясняется более равномерным распределением потенциала вдоль поверхности изолятора. С точки зрения износа и пробоя изоляторов — как показывают опыты Тюри и Пика — напряжение постоянного тока может быть принято примерно равным двойному эффективному напряжению переменного тока, что объясняется отсутствием диэлектрического гистерезиса. Опыт эксплоатации линии Мутье — Лион (125 kV постоянного тока, системы Тюри, изолирована на 45 kV переменного тока, работает с 1906 г.) подтверждает высокий срок службы изоляторов на постоянном токе, а также отсутствие заметной коррозии.

Как показали произведенные в Англии опыты, благодаря отсутствию емкостного эффекта в неоднородном поле распределение потенциала вдоль гирлянды изоляторов на постоянном токе значительно более равномерно, чем на переменном, если изоляторы чисты и сухи. При чистых, но влажных изоляторах, результаты сравнения еще более благоприятны для постоянного тока, так как на переменном токе первоначальная неравномерность распределения потенциала быстро возрастает за счет ускоренного высыхания изоляторов, близких к проводу, сильно нагреваемых диэлектрическими потерями. С другой стороны, при влажных и сильно загрязненных изоляторах неравномерность распределения потенциала на постоянном токе отнюдь не меньше, чем на переменном.

Искусственное уравнение потенциала вдоль гирлянды изоляторов на постоянном токе может сказаться труднее, чем на переменном: уравнитель-

ные кольца, сравнительно эффективные при перенапряжениях переменного характера, едва ли дадут большой эффект в нормальном режиме линии постоянного тока. Гребенчатые острия, применяемые на высоковольтных линиях США и приближающее положительное напряжение перекрытия к отрицательному, должны оказаться весьма полезными для положительных проводов линии постоянного тока, особенно, если отрицательные провода линии расположены на другом ряде опор.

Без детальных исследований было бы неосторожно применить для линейной изоляции при переходе на постоянный ток коэфициент повышения напряжения больше 1,55. Принимая во внимание почти полное отсутствие коммутационных перенапряжений на постоянном токе, представляется вероятным, что эта цифра сможет быть в дальнейшем повышена.

Из указанного следует, что при переводе существующей линии трехфазного тока на постоянный ток напряжение отрицательных проводов будет лимитироваться короной, напряжение положительных — уровнем изоляции. Если линия состоит из четного числа цепей, целесообразно расположить на одном ряде опор только отрицательные провода, на другом — только положительные.

Максимальное эксплоатационное напряжение трехфазной линии 300 kV Куйбышев—Москва равно согласно схематическому проекту 324 kV. При переходе на постоянный ток фазное напряжение на передающем конце отрицательной цепи может быть принято равным $\frac{324}{\sqrt{3}} 1{,}41 = 264$ kV, напряжение положительной цепи — порядка 290 kV.

При тех же потерях Джоуля передаваемая по одной цепи мощность возрастает в 2—2,5 раза; пропускная способность линии, лимитируемая при постоянном токе только плотностью тока, возрастает в 5—6 раз.

Лучшие результаты, чем передача по воздушной линии, дает применение подземного кабеля постоянного тока: благодаря отсутствию диэлектрического гистерезиса и меньшей утомляемости изоляции эксплоатационное напряжение кабеля с компаундным заполнением может быть при переходе на постоянный ток, согласно заявлению директора американской General Cable Company Симмонса, повышено не менее чем в 4—5 раз [9]. Французские [11] и германские [10, 8] исследователи считают даже возможным принять переводной коэфициент 5—7. Для маслонаполненных кабелей подобных исследований, поскольку нам известно, не производилось. Если приведенные выше коэфициенты окажутся применимыми к кабелям отечественного производства, для передачи энергии постоянным током напряжением в 250—300 kV можно будет применить стандартный 110-kV маслонаполненный кабель типа МСБ или же равноценный кабель с компаундным заполнением.

В этом случае стоимость кабельной линии не будет превышать стоимость воздушной линии постоянного тока. Расходы по эксплоатации линии значительно уменьшатся, потери на корону и утечку будут практически равны нулю. Надежность и срок службы высоковольтных кабелей постоянного тока очень высоки: так, 8-km кабельный ввод уже упомянутой линии Мутье—Лион, проложенный еще в 1906 г., работал бессменно и безаварийно до 1930 г., несмотря на происшедшее за это время повышение напряжения линии с 65 kV постоянного тока до 125 kV [16]. Особое значение для наиболее ответственных межсистемных линий передачи имеет, наконец, практически полная неуязвимость подземного кабеля.

Будущие линии передачи единой высоковольтной сети СССР бесспорно смогут использовать преимущества кабелей постоянного тока. Для Куйбышевской гэс более реальной представляется все же передача по воздушным линиям постоянного тока, которые могут быть в первые годы использованы для передачи энергии трехфазным током.

Инверторы, повышающие трансформаторы. На приемном конце линии постоянного тока энергия преобразуется в переменный ток 6-фазными инверторами, аналогичными выпрямителям передающего конца. Применение вентилей Маркса для инвертирования особенно желательно в связи с их быстрой и надежной деионизацией.

При естественной сеточной коммутации инвертор способен отдавать только опережающую мощность с коэфициентом мощности порядка 0,65—0,8; другими словами, инвертор потребляет реактивную мощность, генерируя активную. Такой режим работы для сети Мосэнерго неприемлем. Необходимо применить при инвертировании энергии Куйбышевской гэс искусственную коммутацию посредством дополнительной э. д. с. в форме синусоиды повышенной частоты или же отдельных толчкообразных импульсов напряжения. Схемы искусственной коммутации, позволяющие не только довести cos φ инвертора до 1, но и генерировать в инверторе реактивную мощность, а также позволяющие добиться достаточной перегрузочной способности инвертора, разработаны и испытаны Уиллисом [13], Петерсеном [14], инж. Бабат и др. [15]. В этих схемах мощность источника дополнительной э. д. с. равна лишь небольшой доле генерируемой реактивной мощности.

Следует отметить, что благодаря двухсторонней проводимости вентилей Маркса схемы, подобные предложенной Петерсеном, могут быть осуществлены без удвоения числа вентилей, требуемого при применении тиратронов или ртутных выпрямителей.

При передаче трехфазным током 300 kV проектировщики были вынуждены для уменьшения реактивности понижающих трансформаторов установить на приемном конце каждой цепи по 2 автотрансформатора, каждый на полную мощность цепи, работающих одновременно на 2 московских подсекции [1]. На постоянном токе снижение реактивности имеет меньшее значение; поэтому можно применить трансформаторы нормальной конструкции, более надежные при столь высоких напряжениях. Число, мощность и схема примыкания блоков инвертор-трансформатор определяется схемой секционирования московской сети и условиями резервирования.

Эксплоатация линий. Благодаря отсутствию емкостного и индуктивного эффекта регулирование и производство коммутационных операций на

линии постоянного тока проще и безопаснее, чем на трехфазной линии большой длины. Синхронизация не требуется; включение линии на параллельную работу или на холостой ход может быть произведено в любой момент и с любого конца без опасности чрезмерных толчков или перенапряжений; продолжительность включения исчисляется долями периода.

Вопрос регулирования частоты на генерирующем конце отпадает; генераторы могут вращаться с любой частотой без ущерба для снабжения потребителя. В частности, допустимо и целесообразно изменять число оборотов в зависимости от напора, обеспечивая тем самым оптимальный к. п. д. турбины. На приемном конце мощность линии может регулироваться воздействием на зажигание инверторов. Принимая во внимание неограниченную устойчивость линии постоянного тока и нечувствительность всех элементов передачи к кратковременным перегрузкам, такое регулирование — будучи безинерционным — позволяет чрезвычайно точно поддерживать частоту в приемной системе, а также значительно повысить устойчивость работы последней.

Напряжение линии поддерживается постоянным. Такое решение представляется более целесообразным, чем поддержание неизменной величины линейного тока, например, по схеме Штейнметца, примененной фирмой GEC для ряда опытных и полупромышленных линий постоянного тока. Схема Штейнметца не боится к. з. и обратных зажиганий на стороне постоянного тока и не требует применения искусственной коммутации инверторов, однако она чувствительна к активным перегрузкам и особенно к обрывам линии. Для удовлетворительной работы ее потребовалась бы установка статических конденсаторов мощностью в 50—100% от мощности линии [9]; к. п. д. передачи катастрофически снижался бы при малых нагрузках. Для пиковой неразветвленной линии применение схемы Штейнметца было бы едва ли обоснованным.

Измерение линейного напряжения может производиться, например, электростатическим вольтметром, измерение тока — амперметром, питающимся от шунта, включенного в рассечку нулевого провода между каждым преобразовательным блоком и землей. Измерение мощности целесообразно производить на стороне переменного тока, преимущественно на низкой стороне трансформатора.

Надежность линии постоянного тока весьма высока в связи с неограниченной устойчивостью и практически полным отсутствием коммутационных перенапряжений; к внутренним перенапряжениям может привести только обрыв провода в том случае, если провод не работал параллельно с другими проводами линии.

Подобный режим работы провода возможен при больших нагрузках, так как в целях ограничения выпадения генерирующей мощности при к. з. на линии отдельные выпрямители, как правило, не будут работать параллельно на стороне постоянного тока, а будут включены по блочно-маршрутной схеме.

Отключение поврежденного провода при авариях производится запиранием выпрямителя и инвертора и одновременно — для резерва надежности — отключением масляным выключателем на низкой стороне соответствующих трансформаторов на обоих концах линии. Полное время отключения можно при этом довести до 11—14 m sec [14], т. е. до величины, примерно в 10 раз меньшей, чем на переменном токе. В случае повреждения одного или даже всех проводов одной полярности линия продолжает работать без снижения передаваемой мощности через остающиеся провода с возвратом тока через землю. Как показал опыт эксплоатации ряда линий постоянного тока системы Тюри, длительно работавших с землей в качестве обратного провода, такой режим для линии постоянного тока вполне допустим [16]. Если этого требуют условия нагрузки, выпрямитель и инвертор, питавшие поврежденный провод, могут быть подключены разъединителями через трансферную шину к одному из работающих проводов.

Отрицательный момент с точки зрения надежности передачи постоянным током — это возможность обратных зажиганий в выпрямителях и инверторах. При наличии быстродействующей сеточной защиты такие обратные зажигания приводят в огромном большинстве случаев к перебою в питании длительностью до 1 sec без повреждения вентилей [14]. При условии предварительной формовки вентилей число обратных зажиганий будет достаточно малым, чтобы не представлять неудобств для потребителя.

Конфигурация сети. Если передачу постоянным током удастся осуществить уже для первой очереди линий Куйбышевской гэс, на постоянный ток целесообразно перевести все линии передачи, для которых напряжение 220 kV трехфазного тока является недостаточным. В этом случае следует построить по одной двухпроводной цепи на Урал, на Горький и в Ирригационный район и две двухцепные линии на Москву. В случае обрыва или заземления одного из проводов цепи, последняя может передать полную мощность через другой провод с возвратом тока через землю.

Если цепи первой очереди, указанные в табл. 1 в графе «1944 г.», будут построены на переменном токе, перевод на постоянный ток по мере ввода генераторов второй очереди гэс может производиться следующим образом.

На каждой из двухцепных линий Куйбышев — Москва и Куйбышев — Урал все провода первой цепи присоединяются к положительному полюсу выпрямительной установки, провода второй цепи — к отрицательному. Расположение проводов одной полярности на одном ряде опор позволяет устранить опасность замыканий между проводами (без земли), уменьшить потери и дает возможность лучше использовать изоляцию для каждой полярности.

На одноцепной линии Куйбышев — Горький наиболее экономичным решением представляется использование всех трех проводов в качестве положительных с возвратом тока через землю. Некоторыми авторами рекомендуется использовать в подобном случае провода в качестве отрицательных, так как более низкое напряжение коронирования и более высокое напряжение перекрытия при этой полярности создают хорошие условия

для затухания перенапряжений и повышают грозоупорность линий. Однако новейшие исследования показали, что скорость демпфирования блуждающих волн под действием короны больше именно для положительной полярности; уровень же изоляции для этой полярности может быть, вероятно, повышен гребешковыми остриями до границы коронирования.

Окончательный выбор оптимальной полярности может быть произведен только после соответствующих исследований.

Необходимо также исследовать допустимость возврата тока порядка 1000 А через землю; если, против ожидания, такой режим окажется непригодным для целей нормальной эксплоатации, то можно будет использовать один провод цепи в качестве отрицательного, а два остальных — в качестве положительных. Однако такая линия была бы менее экономична и значительно менее надежна.

В любой из предложенных схем линии Куйбышев — Горький полная мощность линии сможет передаваться при повреждении одного и даже двух проводов.

Для линии Куйбышев — Ирригация принципиально возможны те же решения, как и для линии на Горький. Однако подсчеты показали, что для этой линии — кратчайшей из всех упомянутых — перевод на постоянный ток экономически менее выгоден, чем постройка второй цепи. Поэтому окажется, вероятно, целесообразным оставить эту линию на переменном токе. В пользу такого решения говорит также возможность использовать агрегаты первой очереди, снабженные 300-kV трансформаторами, для питания ирригационной нагрузки, переоборудуя для работы на линии постоянного тока только 1 или 2 агрегата.

Приемные подстанции переменного тока после перевода линий на постоянный ток использовать, очевидно, не удастся.

Сравнение линии передачи Куйбышев — Москва на переменном и на постоянном токе. В табл. 4 приведены результаты сравнения технических и экономических показателей для следующих 4 вариантов линии Куйбышев — Москва: I) четыре 300-kV цепи по блочной схеме (вариант Ленгидэпа); II) две 400-kV цепи по связанной схеме с четырьмя переключательными пунктами, электронными регуляторами и насыщенными дросселями (вариант ВЭИ); III) две 2-проводные воздушные цепи постоянного тока 2×290 kV; IV) передача трехфазным током по двум 300-kV цепям в первую очередь с последующим переводом обеих цепей на постоянный ток.

Все подсчеты относятся к мощности линии в 640 MW, кроме варианта II, для которого имеются данные только для мощности 598 MW. В случае увеличения мощности до 800—1000 MW, экономические показатели резко изменяются в пользу вариантов передачи постоянным током благодаря большей пропускной способности линии. Передача энергии принята для всех вариантов равной 2150 тыс. MWh в год.

В основу подсчетов положена компановка узла, принятая в схематическом проекте, при которой агрегаты гэс распределены между деривационной и приплотинной гэс. Длина линии в этом случае равна 850 km.

Если все агрегаты первой и второй очереди будут — согласно одному из последних вариантов — сконцентрированы на приплотинной установке, что равносильно удлинению линии Куйбышев — Москва на 65 km, условия устойчивости варианта I и II несколько ухудшаются, и все технико-экономические показатели изменяются в пользу вариантов постоянного тока.

Как видно из таблицы, даже при таких, сравнительно невыгодных для постоянного тока предпосылках варианты III и IV дают при лучших технических показателях снижение капиталовложений почти в 2 раза и резкое снижение себестоимости энергии.

Требования к проекту линий первой очереди. Перевод линии трехфазного тока на постоянный ток (вариант IV) может быть произведен со сравнительно небольшими капитальными затратами только в том случае, если уже при строительстве первой очереди будут по мере возможности учтены особенности дальнейшей работы на постоянном токе. Ниже приведены некоторые из основных требований, которые должны быть с этой точки зрения предъявлены к проекту линий первой очереди.

Преимущества последующего перевода линии на постоянный ток могут быть полностью использованы, если линейное напряжение переменного тока будет выбрано в пределах 300—350 kV. При меньшем напряжении взаиморезервирование цепей не будет обеспечено; при большем — использование линии постоянного тока будет неудовлетворительным, что связано с многомиллионным перерасходом государственных средств.

Разветвления и отпайки на линиях постоянного тока возможны, но нежелательны; поэтому следует отдать предпочтение менее разветвленным вариантам трассы.

Должны быть изучены и учтены условия работы изоляторов как при переменном, так и при постоянном напряжении различной полярности.

Чтобы избежать мешающих влияний возврата тока через землю, заземление на обоих концах линии следует выполнить глубинным. Сопротивление земли не должно превосходить примерно 0,5 Ω на каждом конце.

К станционному узлу особые требования не предъявляются, кроме необходимости установки генераторных масляных выключателей (15 kV) на агрегатах, работающих на линии постоянного тока. Повышающая подстанция постоянного тока занимает значительно меньше места, чем подстанция переменного тока; использование этого преимущества может дать значительную дополнительную экономию.

***

Благодаря быстрому развитию техники ионных преобразователей вопрос об осуществимости передачи энергии на постоянном токе высокого напряжения можно считать разрешимым. Однако до осуществления такой передачи необходимо провести ряд крупнейших работ как теоретического, так и практического характера, в том числе: 1) разработка и освоение вполне надежных высоковольтных вентилей большой мощности

Таблица 4

№ п/п	Показатель	Вариант I (300 kV ∞)	II (400 kV ∞)	III (=)	IV (=)
1	Число цепей	4	2	2 (двухпров.)	2 (трехпров.)
2	Пропускная способность 1-й цепи в MW	160	299	Летом 650 Зимой 1000	Летом 800 Зимой 1100
3	Взаиморезервирование цепей	Нет	Есть	Есть	Есть
4	Требуемое время отключения трехфазного к. з. (для динамической устойчивости) в sec	0,15	0,11	Не ограничено	Не ограничено после 1947 г.
5	Стоимость линии передачи и подстанций в млн. руб.	386	418,5	205,6	237,1
6	Капитальные затраты на установленный kW линии в руб.	603	700	321	370
7	Годовые издержки по передаче в млн. руб.	35,4	37	25,0	27,1
8	Стоимость передачи 1 kWh в коп.	1,71	1,79	1,20	1,30
9	Расход алюминия на линию в t	16 600	8 300	8 300	8 300
10	Сокращение годовых потерь в линии по сравнению с передачей переменным током в тыс. MWh	0	0	Около 100	Около 80
11	Коэфициент мощности при работе генератора	0,85	0,85	0,95	0,95
12	Возможность работы при переменной частоте	Нет	Нет	Есть	Есть
13	Компенсация реактивной мощности линии на приемном конце	Треб.	Треб.	Не треб.	Не треб.

Примечание 2.

К пункту 2. Пропускная способность цепи определяется для варианта I динамической, для варианта II — статической устойчивостью, для вариантов III и IV — допустимой плотностью тока с учетом отсутствия скин-эффекта. Повышенная пропускная способность линии постоянного тока обеспечивает полное взаиморезервирование цепей, возможность форсировки линии при аварии в московском кольце и возможность дальнейшего повышения передаваемой мощности без строительства дополнительных цепей.

К пункту 4. Для варианта I указано требуемое время отключения к. з. в московском кольце, для варианта II — время отключения к. з. на самой линии.

К пункту 5. Во всех вариантах стоимость аппаратуры и 1 km линии принята по данным Ленгидэпа. Исключение представляют дуговые выпрямители, стоимость 1 kW которых указана по фактическим данным для пробного экземпляра, изготовленного опытным заводом ВЭИ.

Общая экономия * по сравнению с вариантом I равна для варианта III (по 4 линиям) около 420 млн. руб., для варианта IV (по 3 линиям)— около 290 млн. руб. Экономия получается, главным образом, за счет сокращения числа цепей в 2 раза, а также за счет упразднения высоковольтных масляных выключателей.

Недостаточно выяснен вопрос о необходимости установки на приемном конце трехфазной линии синхронных компенсаторов; если компенсация реактивной мощности линии не сможет быть произведена генераторами московской сети, мощность этих компенсаторов будет для вариантов I и II около 500 MVA [1]; стоимость их в таблице не учтена.

К пункту 7. Общая экономия ежегодных расходов по всему узлу равна для варианта III около 19 млн. руб. в год, для варианта IV—около 13,5 млн. руб.

Экономия получается за счет уменьшения амортизационных отчислений, числа цепей и отсутствия переключательных постов.

К пункту 8. В себестоимость включена стоимость потерь.

К пункту 9. Вариант II требует применения полого провода, нашей промышленностью не освоенного, в других вариантах использован провод нормальной свивки. В варианте III условия короны допускают дальнейшее снижение расхода алюминия без резкого роста потерь.

К пункту 10. В указанных цифрах учтены потери в линии, выпрямителях и реакторах; потери в трансформаторах и генераторах, в подсчете не учтенные, меньше при постоянном токе вследствие улучшения коэфициента мощности.

К пункту 11. Изменение числа оборотов в зависимости от напора позволяет уменьшить износ турбин и увеличить выработку гэс в многоводные годы на 160—170 тыс. MWh за счет улучшения к. п. д. и лучшего использования паводка.

* Согласно последним проектным данным, стоимость аппаратуры и линии трехфазного тока, указанные Ленгидэпом, занижена. Поэтому экономия при переходе на постоянный ток может оказаться выше расчетной приблизительно на 25%.

пробная эксплоатация их на опытной линии; 2) тщательное изучение условий работы кабельных и воздушных линий на постоянном токе; защита линий постоянного тока; 3) выбор схемы компенсации высших гармоник тока на стороне переменного тока (схемы Петерсена, «Электросилы» и др.) [14, 17]; 4) выбор схемы искусственной коммутации инверторов; 5) изучение условий регулирования сверхмощной линии постоянного тока.

Для СССР вопрос о передаче энергии постоянным током намного более актуален, чем для капиталистических стран, так как только Советский Союз должен и способен построить в течение ближайших пятилеток ряд высоковольтных передач тысячекилометровой длины, осуществимых лишь на постоянном токе сверхвысокого напряжения (Ангара, Урал — Кузбасс, нижневолжские гэс). И все же, в то время как капиталистические страны (США, Австралия и др.) построили уже ряд пробных линий передачи выпрямленным током мощностью до 20000 kW, у нас вопросу электропередачи постоянным током уделяется совершенно недостаточное внимание и недостаточные средства.

Такое отношение к проблеме электропередачи постоянным током, проблеме государственного значения, является прямым последствием вредительства врагов народа, троцкистско-бухаринских агентов фашизма, орудовавших в энергетике.

Тяжелое положение на этом фронте характеризуется тем фактом, что, по заявлению ответственных работников ВЭИ, даже при немедленном развороте работ по передаче постоянным током и обеспечении их надлежащими средствами для проработки вышеуказанного комплекса проблем и проверки всей схемы в эксплоатационных условиях требуется около пяти лет напряженной работы.

Известно, что разработка аппаратуры для линий первой очереди Куйбышевской гэс должна быть закончена к 1940 г.; в этих условиях применить постоянный ток можно будет только после ввода второй очереди (1947 г.) при условии, что проверка аппаратуры и схемы в реальных эксплоатационных условиях даст положительный результат. Для такой проверки особенно желательно выделить в период пробной эксплоатации одну из цепей первой очереди куйбышевских линий дальнепередачи (предложение акад. Чернышева).

Чтобы дать для куйбышевских линий передачи оптимальное решение, проверенное в пробной эксплоатации, необходимо широко развернуть научно-исследовательские и проектные работы по передаче постоянным током уже в начале 1938 г., обеспечив их необходимыми средствами.

Всякое промедление может привести к перерасходам, исчисляющимся миллионами рублей, уменьшить надежность энергоснабжения промышленных центров и затормозить развитие нашей электропромышленности. Перегоняя капиталистические страны по масштабам своих сооружений, наша страна должна ориентироваться при выборе технических решений на наиболее прогрессивные тенденции мировой техники.

Литература

1. Толвинский В. А., Электропередача Куйбышев—Москва как инженерная проблема, «Электричество» № 12, 1937.
2. Жданов П. С., О передаче 1000 MW Куйбышев—Москва, «Электричество» № 13, 1935.
3. Брук И. С., Продольная компенсация линий электропередач, «Электричество» № 13, 1936.
4. Buchwald, Der Marx-Stromrichter, VDI, 1934, стр. 737 (см. также «Энергетическое обозрение» № 5, 1935).
5. Meyer H. W., Die Sperrspannung des Marx-Stromrichters, ETZ, 1935, стр. 514.
6. Marx E., Lichtbogenstromrichter, ETZ, 1933, стр. 396.
7. Marx und Göschel, Koronaverluste bei hoher Gleichspannung, ETZ, 1933, стр. 1112.
8. Matthias, Kraftübertragung mit hochgespanntem Gleichstrom, ETZ № 22, 1935, стр. 601.
9. Willis, Bedford, Elder, Constant Current D. C. Transmission, El. Engng., 1935, стр. 102. Дискуссия.
10. Otten, Starkstromkabel und Zubehör, ETZ, 1936, стр. 1403.
11. Delon, Evolution dans la technique des câbles souterrains.
12. Thompson, Arc rectifier. JIEE, 1934, стр. 603.
13. Willis, Harmonic Commutation for Thyratron Inverters, GER, 1932, стр. 632.
14. Petersen, Glaser (Diskussion), ETZ № 32, 1932.
15. Бабат Г. И. и Кацман Я. А., Тиратронные компенсаторы, «Электричество» № 4, 1937.
16. Thury, R., Kraftübertragung auf grosse Entfernungen durch hochgespannten Gleichstrom, ETZ, 1930, стр. 114.
17. Асташев М. А., Схема включения ртутных выпрямителей, „Электричество" № 7, 1937.
18. Marx E., Hochspannungslichtbogenstromrichter, ETZ, 1935, стр. 922.

О передаче энергии Куйбышев—Москва постоянным током

К. А. Круг
ВЭИ

ЗАТРУДНЕНИЯ, с которыми приходится иметь дело при осуществлении электропередачи из Куйбышева в Москву, как-то: обеспечение устойчивости ее, регулирование коэфициента мощности и напряжения во время работы, при включениях и выключениях, борьба с авариями, в том числе и с случайными к. з., — невольно направляют техническую мысль на применение уже для этой электропередачи постоянного тока высокого напряжения. Это тем более напрашивается, что на трехфазном токе эта передача может быть осуществлена лишь при применении напряжения порядка 350—400 kV, что еще до сих пор ни в одной стране не реализовано. Самая мощная передача в Северной Америке из Болдер Дам в Лос Анжелос протяжением в 330 km передает лишь 240 MW при напряжении лишь в 287 kV. Трансформаторы на 350—400 kV и масляные выключатели на такое же напряжение и на разрывную мощность порядка 5—6 тыс. MW еще не созданы. Поэтому кажется весьма заманчивым при наличии всех этих трудностей осуществить передачу Куйбышев — Москва на постоянном токе высокого напряжения.

Лично я твердо убежден, что в будущем все такие сверхмощные и сверхдальние электропередачи будут осуществляться на базе постоянного тока высокого напряжения. Однако не следует скрывать, что проблема передачи энергии постоянным током находится в настоящее время в начальной стадии своей разработки и имеющиеся весьма обнадеживающие материалы все же не таковы, чтобы можно было говорить о применении постоянного тока для куйбышевской электропередачи первой очереди.

Насколько мне известно, в конце 1938 г. должны быть закончены все предварительные работы по применению 400 kV трехфазного тока, должны быть разработаны технические условия на оборудование и основные типы конструкций с тем, чтобы в 1939—1940 гг. все необходимое оборудование было изготовлено, в 1941 г. смонтировано и в 1942 г. пущена Куйбышевская станция. В части применения трехфазного тока высокого напряжения мы имеем более чем двадцатилетний опыт, в отношении трехфазного тока речь идет лишь об удвоении напряжений и увеличении мощности. Каких-нибудь новых принципиальных вопросов решать не придется.

Если же мы будем говорить о постоянном токе, то тут все ново. Получение постоянного тока высокого напряжения непосредственно от машин отпадает, так как при помощи коллектора нельзя получить большой мощности, а к тому же питание распределительных сетей ввиду неограниченных возможностей трансформации энергии переменного тока должно будет производиться переменным трехфазным током.

Поэтому электрическая энергия и впредь будет получаться от мощных генераторов переменного тока.

В настоящее время разработаны и детально изучены схемы как для выпрямления переменного тока в постоянный, так и для преобразования постоянного тока в переменный. Существуют выпрямительные установки мощностью до 100 MW, напряжением до 1000 V на стороне постоянного тока. На электрифицированных ж. д. имеются ртутники, дающие 3000 V на стороне постоянного тока, но мощность их сравнительно невелика.

Радиостанции применяют 80—100-kV ртутные выпрямители, но мощность их не превышает сотен киловатт. Если ртутники и допускают последовательное включение, то до осуществления выпрямительных и преобразовательных установок с ртутниками на напряжения в 200 kV и на мощность порядка сотен тысяч киловатт еще очень далеко, и большой вопрос, удастся ли вообще технически рационально и экономически целесообразно разрешить проблему выпрямления и преобразования больших мощностей при высоком напряжении при помощи ртутников.

Не лучше дело обстоит с так называемыми тиратронами. Хотя при их посредстве и легче получить высокое напряжение, но до сих пор их удается строить лишь на сравнительно небольшие токи. Кроме того, они не выдерживают совершенно перегрузок и при к. з. быстро выходят из строя.

Большие перспективы открывают дуговые выпрямители, разработанные Эрвином Марксом, работающие в атмосфере инертного газа при повышенном давлении. Из материалов, опубликованных как самим Марксом, так и его сотрудниками, видно, что им удалось построить выпрямитель, который при малых токах в состоянии давать выпрямленное напряжение в 700 kV на стороне постоянного тока и при низких напряжениях порядка 6 kV давать токи до 600 A, при этом будто бы сгорание вольфрамовых электродов невелико, так что смена электродов может производиться примерно каждые третьи сутки (?). Опубликованные данные относятся лишь к выпрямлению одной полуволны однофазного тока и работе выпрямителя на активное сопротивление. Никаких данных о выпрямлении многофазного тока высокого напряжения, о явлениях, связанных с так называемым перекрытием анодов и переходом дуги с одной фазы на другую, далее о преобразовании постоянного тока высокого напряжения в переменный при помощи дугового выпрямителя,— ни в иностранной ни в нашей литературе не имеется.

Для того чтобы можно было приступить к осуществлению опытной передачи, необходимо разрешить вопрос об износе электродов, дутьем, разработать методы зажигания и управлением дуговым выпрямителем. Если проблема дугового выпрямителя и преобразователя будет удачно разрешена, то следующим этапом должна быть разработка общей схемы выпрямления и преобразования, исследование условий коммутации, выяснение борьбы с высшими гармониками, покрытия реактивной мощности и разрешения вопроса отключения всей системы при к. з.

Все эти вопросы имеют первенствующее значение и требуют для своего разрешения тщательной проработки. Следует прямо сказать, что эта работа не одного или двух лет, а более продолжительного отрезка времени; потребный срок для разрешения всех этих вопросов будет зависеть от средств и сил, которые будут направлены на эту работу. Во всяком случае даже при наличии достаточных средств и сил работа по выяснению вопроса о возможности применения постоянного тока для Куйбышевского гидроузла не может быть закончена к сроку, какой требуется для своевременного окончания первой очереди этого сооружения.

Можно лишь пожелать, чтобы исследования по постоянному току производились наиболее ускоренными темпами с тем, чтобы к тому времени, когда приступят к осуществлению второй очереди Куйбышевского узла, можно было бы конкретно поставить вопрос о применении постоянного тока для передачи энергии на Москву. При переходе на постоянный ток можно было бы тогда не строить вторых линий передач, что дало бы весьма существенную экономию. Не следует также забывать, что в четвертую пятилетку станет, наверное, вопрос об использовании энергии Ангары и других сибирских рек. При той протяженности, которую будут иметь линии, транспортирующие энергию гидроустановок этих рек, передача энергии переменным током вряд ли будет осуществима и лишь применение постоянного тока даст возможность использовать эти энергетические ресурсы.

Постоянный ток может применяться лишь для маршрутной передачи энергии, т. е. данная выпрямительная установка может работать лишь на свою преобразовательную установку. Это обусловлено тем, что отключение линий в случае к. з. на стороне постоянного тока может производиться лишь отключением всей установки на обоих концах на стороне переменного тока как при посредстве сетей, так и при посредстве масляных выключателей.

Инж. Червоненкис указывает на отсутствие перенапряжений как на преимущество применения постоянного тока. Между тем это не совсем так.

В нагруженной линии постоянного тока сосредоточивается весьма большая магнитная энергия, которая в случае обрыва линии освобождается и должна повлечь за собой весьма большие перенапряжения.

Далее инж. Червоненкис не учитывает влияния высших гармоник как на гидростанцию, так и на конечную подстанцию, питающую распределительную сеть потребителей. Эти высшие гармоники снижают отдаваемую гидрогенераторами мощность, так как наличие гармоник увеличивает потери в генераторах, и повышают температуру обмоток. На приемной подстанции высшие гармоники должны быть каким-нибудь образом компенсированы и, кроме того, должен быть решен вопрос о покрытии реактивной мощности. Преобразователи дают весьма значительный опережающий ток, который необходимо покрыть отстающим реактивным током со стороны каких-то синхронных машин, которые в то же время должны покрывать и отстающую реактивную мощность потребителей энергии.

В статье инж. Червоненкиса весьма слабо затронут вопрос о ликвидации последствий аварий в случае к. з. на линии и дуговых аппаратах. В этом отношении знаменательна установка, разработанная Виллисом, Бедфордом и Эльдером и осуществленная GEC.

Эта установка передачи постоянным током на 5,4 MW при 30 kV на 27 km работает не на напряжении постоянного значения, а на токе постоянного значения. При помощи известной схемы Бушеро энергия переменного тока постоянного напряжения преобразуется в энергию переменного тока постоянной силы, так что в линии передачи постоянный ток при всех нагрузках имеет всегда одно и то же значение, и потому к. з. на линии при такой схеме совершенно не страшны, опасность перенапряжений на стороне переменного тока при обрыве линии остается.

Статья инж. Червоненкиса представляет большой интерес в том отношении, что в ней впервые сделана конкретная попытка на цифрах показать ту примерную величину экономии, которую может дать постоянный ток. Мне кажется даже, что экономичность самой линии передачи могла бы быть оценена несколько выше, чем это сделал автор.

Я был бы рад, если бы проектирующие организации в большей мере заинтересовались постоянным током для сверхмощных и сверхдальних передач, которые в будущем нам придется осуществлять в нашем Союзе, и содействовали бы постановке в широком масштабе работ по преобразованию тока.

А. А. Чернышев
Ленинград

ПРЕДЛОЖЕНИЕ о применении постоянного тока высокого напряжения для передачи энергии с куйбышевских электростанций, несмотря на несомненную экономию как в капитальных затратах, так и в эксплоатационных расходах, не может быть принято по следующим соображениям:

1. В настоящее время не осуществлены даже в небольшом масштабе установки постоянного тока, на которых была бы доказана полная надежность работы вентильных устройств Маркса. Результаты лабораторных исследований дают основания заключить о возможности осуществления с хорошими эксплоатационными и техническими показателями передачи энергии по системе, предложенной Марксом. Однако в силу того, что роль куйбышевских электростанций в будущем в снабжении основных европейских районов Союза исключительно высока, без предварительного эксплоатационного опыта применение этой системы не может быть рекомендовано. Всякие «детские болезни», неизбежные при переводе новой системы из области лабораторных исследований в эксплоатацию, могут создать катастрофическое положение со снабжением электроэнергией основных промышленных районов Союза.

2. Несмотря на кажущуюся полную убедительность возможности применения экспериментального определения рабочей мощности вентилей Маркса при помощи искусственной схемы, описанной ETZ, 1936 г., № 21, едва ли можно на основании только этих опытов считать доказанной их действительную мощность. Аналогичное положение мы имеем с выключающими приспособлениями, где много

раз пытались получить действительные разрывные мощности их, пользуясь искусственными схемами, имитирующими физические явления при разрыве дуги, однако при наличии такого рода схем строительство мощных станций для испытания выключающих приспособлений продолжается в связи с тем, что в искусственных схемах (отдельно по току и напряжению) не могут быть учтены все явления, которые имеют место на практике.

3. Опыт передачи электроэнергии с установки на плотине Болдера и расчеты, произведенные для Куйбышевского гидроузла, показывают, что передача электроэнергии при помощи трехфазного тока может быть осуществлена с достаточно высокими техническими и эксплоатационными показателями и при капитальных затратах на линии передачи и подстанций, не выходящих за пределы допустимых на передачу каждого квт-часа. Несомненная техническая осуществимость передачи трехфазным током и достаточная надежность позволяют рекомендовать эту систему для осуществления.

4. Краткость срока, остающаяся до пуска в эксплоатацию Куйбышевского гидроузла, не позволяет организации опытных эксплоатационных установок постоянного тока в таком масштабе, который позволил бы считать возможным осуществление такого рода передачи по системе Маркса именно для Куйбышевского гидроузла.

5. Из всех предлагавшихся систем электропередач постоянного тока с вентильными устройствами система Маркса для высоких напряжений является наиболее близкой к практическому осуществлению, поэтому едва ли возможно предлагать передачу энергии по какой-либо иной системе, включая и машины постоянного тока.

Однако, принимая во внимание важность внедрения передачи энергии постоянным током сверхвысокого напряжения для будущего энергетического развития Союза и в связи с тем, что в дальнейшем предстоит сооружение аналогичных и еще более крупных электроэнергетических гидроузлов (Енисей, Ангара), необходимо по моему мнению:

а) Широко развернуть научно-исследовательскую работу, связанную с разрешением проблемы передачи энергии постоянным током сверхвысокого напряжения.

б) Построить опытную линию полуэксплоатационного типа.

в) Предусмотреть при проектировании линии электропередачи и подстанций Куйбышевского гидроузла возможность производства испытаний передачи электрической энергии постоянным током на одной из линий, — повидимому, наиболее рационально на одной из линий Куйбышев — Москва — с возможностью опытной эксплоатации.

Что касается подсчетов экономии в капитальных затратах и сокращения эксплоатационных расходов при переходе от электропередачи трехфазным током на постоянный ток, приведенных в статье инж. Червоненкиса, то я считаю, что порядок величин экономии в капитальных затратах и эксплоатационных расходах определен правильно.

А. А. Горев

Ленинградский индустриальный институт

ЗАДАЧА применения постоянного тока для передачи электрической энергии на дальнее расстояние в ближайшие годы будет, повидимому, разрешена окончательно. Это решение для передач, подобных куйбышевским, представляется, несомненно, в принципе, наилучшим из всех возможных. Судя по литературным данным, исходящим, правда, только от проф. Э. Маркса и его сотрудников, изобретенный и сконструированный им выпрямитель дает удовлетворительное техническое решение труднейшей части проблемы — преобразования переменного тока высокого напряжения в постоянный и обратно.

Для практического применения такой системы (если производящиеся сейчас у нас (в ВЭИ) исследования подтвердят основные утверждения изобретателя) необходимо будет разработать как те проблемы, связанные с этим способом передачи, которые сформулированы уже сейчас и затронуты в статье инж. Червоненкиса, так и ряд других вопросов, которые, несомненно, возникнут в процессе дальнейшей проработки схемы и эксплоатации первой опытной передачи. Лишь после разрешения всех основных задач на базе достаточно продолжительного опыта безукоризненной эксплоатации можно будет с полной уверенностью рекомендовать эту систему для куйбышевских передач, являющихся по своему масштабу первыми в мире и требующими колоссальных вложений.

На настоящей стадии разработки проблемы передачи постоянным током было бы одинаково ошибочно как положить эту совершенно недостаточно изученную схему в основу такого проекта, как куйбышевский, так и отказ от срочного развертывания научно-исследовательских работ в этом направлении. Поэтому мы полагаем, что: 1) разработка основного варианта куйбышевского проекта должна вестись на базе трехфазного переменного тока частоты 50 Hz, 2) передача куйбышевской энергии помощью постоянного тока должна быть включена в программу технического проекта как один из дополнительных вариантов, на разработку которого вместе со всеми необходимыми исследованиями и опытами должна быть отпущена отвечающая важности этой проблемы сумма средств, и 3) что линии основного варианта передачи следует проектировать таким образом, чтобы переход на эксплоатацию постоянным током был бы возможен без переделки линий или с минимальным количеством изменений. Для выяснения последнего вопроса некоторые исследования, в частности, по поведению изоляции при постоянном токе, а также эскизную разработку проекта передач по этому варианту следует произвести срочно с тем, чтобы необходимые данные были получены своевременно.

Следует горячо приветствовать инициативу автора в острой постановке проблемы применения постоянного тока. Он совершенно прав, когда утверждает, что применение постоянного тока выгодно именно для передач такого масштаба, как куйбышевские, — передач, выходящих за пределы того, что может потребовать от техники неплановое хозяйство капиталистических стран. Эта задача является нашей задачей — мы и должны ее разрешить.

В. Г. Бирюков

ВЭИ

ДАННЫЕ схематического проекта, на который ссылается автор, — приплотинная гэс и деривационная гэс — в настоящее время сильно устарели, так как проект переработан Управлением Куйбышевского гидроузла. Поэтому неправильно и деление на очереди, которое приводит автор в начале своей статьи и которое он также приводит в качестве одного из доводов за применение постоянного тока для линий передач Куйбышевской гэс. Неправильна и основная предпосылка автора, приводимая им в статье в доказательство преимуществ передачи постоянным током, — достаточная разработка выпрямителя высокого напряжения. До сих пор не существует в природе выпрямитель на высокое напряжение. Ссылки на опыт ВЭИ преждевременны, так как даже с точки зрения получения лабораторного образца выпрямителя на необходимое напряжение имеющиеся результаты работ ВЭИ и других научно-исследовательских организаций недостаточны. Потребуется многолетняя, упорная работа, чтобы получить эксплоатационно надежный выпрямитель на требуемое для длинных линий передач напряжение.

В течение ближайших пяти лет научно-исследовательские организации не смогут уделить достаточно сил и средств для разработки проблемы постоянного тока высокого напряжения, так как перед ними стоит задача разработать и освоить оборудование для Куйбышевской гэс на переменном токе и напряжение порядка 300–400 kV в чрезвычайно ограниченные сроки.

В этой области имеется уже запаздывание, так как до сих пор отсутствует необходимая исследовательская база и нет необходимых ассигнований (ударный контур 6000–7000 kV, испытательный трансформатор на 1500 kV). Создание же такой базы потребует минимум 2 лет. Для разработки и освоения постоянного тока высокого напряжения также потребуется ряд экспериментальных установок, к проектировке которых в настоящее время еще не приступили. Таким образом нельзя надеяться, что в течение ближайших пяти лет все вопросы, которые необходимо решить для освоения постоянного тока высокого на-

пряжения (выпрямители, выключатели, изоляция, эксплоатационные вопросы), будут проработаны.

В ближайшие пять лет электропромышленность Союза должна очень напряженно работать, чтобы освоить оборудование на напряжение в 300—400 kV и удовлетворить все запросы Куйбышевской гэс и растущих наших энергетических систем. Удовлетворение этих запросов, а также и нужд всей нашей энергетики, не удовлетворяемых полностью сейчас, исчерпает возможности нашей электропромышленности в 4-й пятилетке. Одновременно разработать, подготовить необходимую экспериментальную и производственную базу и освоить оборудование для постоянного тока сверхвысокого напряжения электропромышленность будет не в состоянии. Кроме же освоения, необходимо будет и эксплоатационное опробование оборудования постоянного тока сверхвысокого напряжения на специальной линии передачи или же не на столь ответственной установке, прежде чем осуществить такую передачу для станций Большой Волги.

Данные автора о стоимости линий постоянного тока также вызывают сомнение и в настоящее время нельзя считать реальными (автором принята фактическая стоимость изготовления пробного образца выпрямителя Маркса на заводе ОЭМЗ ВЭИ, без стоимости всех дополнительных устройств), следовательно, требуют поправок и экономические подсчеты.

Резюмируя, я считаю, что для Куйбышевской гэс нельзя считать реальным (и достаточно обоснованным) вариант передачи на постоянном токе сверхвысокого напряжения. О применении постоянного тока для линий передач можно говорить лишь для последующих станций Большой Волги.

Автор прав, говоря, что научно-исследовательские работы по постоянному току должны вестись более широким фронтом.

Однако, если говорить об очередности научно-исследовательских работ, то, конечно, нужно отдать преимущество работам, связанным с освоением оборудования на напряжение в 300—400 kV переменного тока, необходимого для Куйбышевского узла. К сожалению, повторяю, и эти работы еще не обеспечены необходимыми средствами — экспериментальной базой.

К слову сказать, создание производственной базы и экспериментальных установок для исследования вопросов постоянного тока высокого напряжения также потребует значительных средств, возможно даже такого же порядка, как и экономия, на которую указывает автор.

Создание же экспериментальной и производственной базы для освоения оборудования на 300—400 kV одновременно решает вопрос об обеспечении оборудованием и существующих энергетических систем Союза, чего нет сейчас. Этого также нельзя сбросить со счетов при выборе варианта передачи для Куйбышевской гэс.

С. М. Брагин
Москва

ПРОБЛЕМА передачи электроэнергии постоянным током высокого напряжения, несомненно, представляет исключительный интерес, в особенности для Советского Союза, вступившего на путь постройки сверхмощных энергетических узлов и сверхдальних электропередач.

С точки зрения кабельной техники представляется полная возможность осуществить надежный электрический подземный кабель на напряжение до 500 kV прямого тока. Это обстоятельство чрезвычайно важно, так как оно позволило бы все сверхмощные передачи убрать в землю и тем самым увеличить надежность электроснабжения как в мирное, так и в военное время.

Удешевление эксплоатации линий за счет сокращения расходов по обслуживанию и уменьшению потерь диэлектрических и на корону, а также сокращение длины линий передач также является следствием перехода с воздушных линий передач на кабельные.

Стоимость кабельной линии на прямом токе с развитием кабельной техники не только сравняется со стоимостью соответствующей воздушной линии передачи, но, вероятно, будет даже ниже ее.

Однако в настоящее время говорить об изготовлении и прокладке таких кабельных линий [illegible] ориентируясь на конец третьей и начало четвертой пятилеток, так как переход на массовое производство сверхвысоковольтного кабеля возможен лишь после проведения научно-исследовательских работ, изготовления и испытания в эксплоатационных условиях опытных линий и после создания соответствующих производственных мощностей по этому типу кабеля в виде постройки новых кабельных заводов.

Нужно отметить также необходимость увеличения потребления кабельной промышленностью дефицитного свинца, лимитирующего в настоящее время выпуск освинцованных силовых и телефонных кабелей; для выполнения передачи Куйбышев — Москва двумя одножильными сверхвысоковольтными кабелями прямого тока потребовалось бы примерно удвоить годовое потребление свинца кабельной промышленностью.

Резюмируя, можно сказать следующее: разработку проблемы сверхвысоковольтной электропередачи на прямом токе и, в частности, разработку проблемы электрического подземного кабеля на сверхвысокие напряжения совершенно необходимо начать теперь же. В первую же очередь электропередачи Куйбышевского гидроузла, очевидно, придется осуществлять на переменном токе воздушными линиями, причем наиболее рационально было бы применить для них полый провод из алюминиевого сплава типа альдрей.

С. А. Кукель-Краевский
Московский энергетический институт им. Молотова

НЕ ВХОДЯ в рассмотрение технических предложений автора статьи, так как их критику дадут другие специалисты, я остановлюсь на плановой стороне проблемы.

Я считаю преимущества передачи энергии на далекое расстояние постоянным током высокого напряжения в наших условиях настолько серьезными, что являюсь горячим и убежденным сторонником постановки глубокого и всестороннего изучения этой проблемы с большевистской настойчивостью и целеустремленностью. Это — наиболее важная научно-исследовательская задача в области электротехники на ближайшие годы. К сожалению, первую очередь передачи энергии от Куйбышевской станции придется осуществить на трехфазном токе. Тем не менее это не только не снимает с очереди необходимости разработки проблемы передачи энергии постоянным током, но, наоборот, повелительно требует как можно скорее наверстать упущенное.

Тов. Червоненкис достаточно четко изложил соображения, обосновывающие огромные преимущества постоянного тока. Я лично выдвигаю на первое место среди этих преимуществ возможность практического осуществления ответственных линий передач подземными кабелями.

Мы приступаем к сооружению основного высоковольтного костяка единой электроэнергетической системы Европейской части СССР. Эти основные магистрали надо осуществить подземными. При трехфазном токе реализация такого варианта потребовала бы непосильных капитальных затрат, при постоянном же токе он вполне осуществим и даже не потребует бо́льших затрат, чем проведение воздушных линий.

На второе место среди преимуществ я поставил бы несомненное снижение затраты цветного металла при переходе на постоянный ток.

Имеет также немаловажное значение отмеченная инж. Червоненкис возможность снизить потерю мощности в гидротурбинах в периоды снижения напора, если переход на постоянный ток избавит нас от необходимости держать число оборотов строго постоянным.

Со своей стороны прибавлю еще одно соображение в пользу скорейшей разработки проблемы, не жалея сил и средств. В течение ближайших 10 лет можно ожидать прироста выработки электроэнергии по СССР порядка 140 млн. MWh. Значительная часть этого прироста может и должна быть получена именно за счет гидроэнергии. Даже если только 25% прироста энергии покрывать за счет гидроэнергии, понадобится за это время получить 35 млн. MWh в год гидроэнергии от новых станций, т. е. *три раза больше, чем может дать Куйбышевский гидро-*[illegible] максимальная цифра. Легче всего получить

ВОЛОГОДСКАЯ

такой большой прирост гидроэнергии, если строить именно крупнейшие и относительно более дешевые объекты, как Куйбышевская. Поэтому совершенно ясно, что с момента начала вступления первых агрегатов Куйбышевского гидроузла надо непрерывно вводить из года в год бо́льшую мощность на волжских гидрогигантах, обеспечивая сбыт энергии в единую систему. К концу четвертой пятилетки необходимо будет ввести в эксплоатацию вслед за Куйбышевской и Камышинскую гидростанцию. И если часть линий куйбышевской передачи будет выполнена на переменном токе, то связи Камышинской станции с соседними системами и, в частности, линию Камышин — Липецк — Москва (около 900 km) надо уже сразу осуществить на постоянном токе. А для этого нельзя терять ни одного года интенсивной работы.

При дальнейшей разработке вопроса надо по соображениям, о которых я говорил во время дискуссии в ВЭИ, предусматривать линии постоянного тока не только на огромную пропускную способность, намеченную т. Червоненкис, но и на меньшую — примерно порядка 300—400 MW. Я думаю, что постоянный ток понадобится и для выпуска в единую сеть энергии менее крупных гидростанций волжского бассейна, главным образом для того, чтобы связать их с системами подземными кабелями. Ради этой последней задачи я считал бы целесообразным пойти на осуществление передачи постоянным током даже для тех линий, которые при постоянном и переменном токе почти равноценны.

Связь же Куйбышевского гидроузла с будущим Камышинским на юг и Чебоксарским на север тоже следует обязательно осуществить подземными кабелями.

ВОПРОСЫ ЭКОНОМИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Методы рационализации и нормирования потребления электроэнергии при прокатке черных металлов[1]

Я. Л. Франкфурт
Москва

ТЕОРЕТИЧЕСКОМУ и опытному изучению процесса прокатки посвящено немало работ крупнейших специалистов как за границей, так и у нас в Союзе, причем значительное внимание уделено и энергетическому фактору, связанному с этим процессом. Но изучение этого фактора производилось, главным образом, под углом зрения определения усилий, возникающих при прокатке металлов, и мощности приводных двигателей прокатных станов. Вопросу же о том, какие факторы и в какой мере влияют на удельный расход энергии при прокатке, и мероприятиям для возможного снижения этого удельного расхода до сих пор уделялось очень мало внимания.

Между тем прокатка металлов в валках является одним из наиболее энергоемких производств, и всякая рационализация этого процесса под углом зрения снижения удельного расхода энергии может дать значительный экономический эффект.

Настоящая статья имеет целью выяснить влияние основных технологических факторов на удельный расход электроэнергии при прокатке черных металлов. Можно полагать, что выводы, к которым мы придем, в значительной мере смогут быть приложены и к прокатке цветных металлов.

Основные факторы, определяющие удельный расход энергии при прокатке

Для выявления основных факторов, определяющих удельный расход энергии при прокатке, установим прежде всего, из каких элементов складывается работа, затрачиваемая на процесс прокатки.

В общем виде имеем:

$$A = A_0 + A_1 + A_2 + A_3 + A_4, \qquad (1)$$

где A — общая работа, затрачиваемая на прокатку при прохождении полосы через валки, A_0 — работа, затрачиваемая на холостой ход стана, A_1 — работа, затрачиваемая на деформацию металла, A_2 — работа трения металла о стенки валков (ручьев), A_3 — дополнительная работа трения в частях стана при прохождении полосы через валки, A_4 — работа, требуемая на ускорение (торможение) движущихся масс во время пропусков (у реверсивных станов). Сумму составляющих: $A_u = A_1 + A_2 + A_3 + A_4$, как возникающих только во время пропусков, принято называть чистой работой прокатки.

Прежде всего рассмотрим, какие факторы определяют величину отдельных составляющих работу прокатки.

Работа холостого хода A_0. Эта работа расходуется в течение всего времени нахождения стана в действии, т. е. как во время пропусков, так и во время пауз, и идет она на покрытие всякого рода потерь, как-то: а) потери холостого хода двигателя, б) потери на трение в шестеренной клети и в редукторе (при наличии его), в) потери на трение в клети (или в клетях стана, если один двигатель обслуживает несколько клетей), г) потери, вызываемые маховиком (при наличии его).

Не входя в рассмотрение каждого из этих слагающих в отдельности, укажем лишь, что большое влияние на величину мощности холостого хода стана имеет степень зажатия шеек прокатных валков в подшипниках, так что для одного и того же стана в зависимости от этого фактора

[1] Из работы, выполненной проф. Я. Л. Франкфуртом в кабинете промышленной энергетики Энергетического института Академии наук СССР (руководитель проф. Е. А. Русаковский).

эта мощность может колебаться в значительных пределах.

Работа деформации металла (A_1). В общем виде работа деформации металла может быть выражена следующей формулой:

$$A_1 = kpV\frac{H-h}{h}, \qquad (2)$$

где k — опытный коэфициент,
p — удельное давление металла на валок,
V — объем прокатываемого металла,
H — толщина полосы до прокатки,
h — толщина полосы после прокатки.

Величина $H - h$ характеризует абсолютную величину обжатия.

Входящее в эту формулу удельное давление валков на металл само находится в довольно сложной зависимости от ряда факторов.

Более или менее полно эта зависимость отражается формулой Экелунда[2] и др.

Чтобы получить соответствующую мощность деформации P_1, нам надо в формуле (2) величину V заменить секундным объемом металла V_c, и тогда эта формула примет вид:

$$P_1 = kpV_c\frac{H-h}{h}. \qquad (3)$$

Но

$$V_c = bhv,$$

где v — скорость прокатываемой полосы, b — ее ширина, остальные обозначения — как выше. Следовательно:

$$P_1 = kpb\,(H-h)\,v. \qquad (3)$$

Работа трения металла в валках (A_2). Процесс деформации металла при прохождении его через валки связан со скольжением частиц металла как относительно друг друга, так и относительно поверхностей ручьев (калибров) валков. Это скольжение требут значительной затраты работы на преодоление связанного с ним трения.

Так как определение этой работы опытным путем невозможно (нельзя ее выделить при опытах), теоретическое же ее определение затруднительно вследствие необходимости пользоваться весьма приближенными значениями коэфициента трения, то приходится довольствоваться приближенным методом на основе формулы, предложенной проф. Верещагиным, которую за недостатком места приводим без вывода.

$$A_2 = 2F_T\,\Delta l = 2m\,(l-L)\sqrt{R\,(H-h)\,p}\left(1+\beta\frac{0{,}5U-b}{b}\right), \qquad (4)$$

где F_T — сила трения на цилиндрической и боковой поверхности ручья одного валка,
Δl — удлинение металла за пропуск,
m — коэфициент пропорциональности (1—1,5),
L — длина полосы до пропуска,
l — длина полосы после пропуска,
R — радиус цилиндрической поверхности ручья валка,
β — коэфициент, учитывающий, насколько сила трения на боковой поверхности ручья больше, чем на цилиндрической поверхности (от 0 до 3 и выше),

[2] S. Eckelund, Jernkontorets Annaler № 2, 1927.

U — периметр ручья валка,
b — ширина выходящей из валков полосы.

Соответствующую мощность получим, если A_2 разделим на длительность пропуска в секундах $t_{пр}$:

$$P_2 = \frac{A_2}{t_{пр}}.$$

Но так как

$$t_{пр} = \frac{l}{v},$$

то

$$P_2 = \frac{A_2 v}{l}. \qquad (4)$$

Мы придали выражению для P_2 такой вид, чтобы можно было выявить влияние скорости прокатки на удельный расход энергии.

Дополнительная работа трения (A_3). Во время прохода полосы через валки (период пропуска) на органы стана, воспринимающие усилия, возникающие при прокатке (вкладыши подшипников валков и т. п.), действует не только собственный вес приводимых в движение частей стана, но и во много раз большее давление металла на валки. Работа трения, вызываемая собственным весом движущихся частей, учитывается, как мы видели, работой A_0 холостого хода стана, рассматриваемые же дополнительные трения вызывают дополнительную затрату работы, являющуюся в основном функцией давления металла на валки.

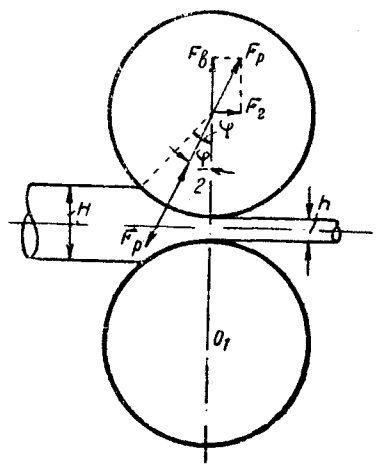


Рис. 1. $F_в$ — вертикальная составляющая, $F_г$ — горизонтальная составляющая, F_p — результирующее давление

Не входя в подробное рассмотрение этого вопроса, укажем, что можно без большой погрешности с точки зрения интересующей нас зависимости принять, что равнодействующая радиальных давлений металла на валок проходит под углом, равным половине угла захвата (рис. 1). Тогда с некоторыми допущениями получается:

$$A_3 = 2k_1F_pf\lambda l\frac{d_ш}{D} \qquad (5)$$

и, аналогично тому, как для P_2, находим:

$$P_3 = \frac{A_3}{t_{пр}} = \frac{2k_1F_pf\lambda d_ш v}{lD} = 2k_1F_pf\lambda\frac{d_ш}{D}v, \qquad (5')$$

где k_1 — коэфициент, учитывающий дополнительные трения в сочленениях шпинделей, в шейках и в зубьях колес шестеренной клети и т. п. ($k_1 = 1{,}03 - 1{,}06$),
F_p — равнодействующая давлений на подшипники одного валка,
f — коэфициент трения,
λ — коэфициент вытяжки $= \frac{l}{L}$,
$d_ш$ — диаметр шейки валка,
D — катающий диаметр ручья (калибра).

Работа ускорения (торможения) (A_4). У реверсивных станов после каждого пропуска стан ос-

танавливается и реверсируется, что связано с затратой определенных усилий на ускорение и замедление приводимых в движение и останавливаемых масс.

Работа, связанная с этими усилиями, у реверсивных станов определяется на основе законов механики, и мы на этом вопросе останавливаться не будем, укажем лишь, что в случаях применения электродинамического торможения с рекуперацией энергии торможения, как, например, у станов, управляемых по схеме Вард-Леонарда, это обстоятельство следует учитывать.

Выявив, таким образом, составные элементы общего расхода энергии на процесс прокатки, перейдем теперь к анализу отдельных факторов, влияющих на соответствующий удельный расход энергии, отнесенный к единице продукции при прокатке.

Влияние технологических факторов

Температура нагрева металлов. Выше мы видели, что составляющие чистой работы прокатки $A_ч$ в той или иной степени зависят от удельного давления p металла на валки; последнее же зависит от температуры нагрева прокатываемого металла. Таким образом удельный расход энергии на процесс прокатки также зависит от температуры прокатываемого металла. Чтобы выявить эту зависимость, нами на основе учета степени влияния удельного давления p на величину отдельных составляющих работы прокатки и этих составляющих на величину общей работы прокатки для трех сортов стали и для четырех наиболее типичных случаев прокатки, а именно:

Случай 1. Прокатка простейшего профиля в подобный же профиль (прямоугольный, квадратный, круглый) на нереверсивном стане.

Случай 2. Прокатка профиля средней сложности на нереверсивном стане.

Случай 3. Прокатка сложных профилей на нереверсивном стане (рудничные рельсы, тавровое железо и т. п.).

Случай 4. Прокатка сложных профилей на реверсивном стане (рельсы, балки и т. п.).

Составлен график (рис. 2), из которого можно сделать некоторые, важные для рассматриваемого вопроса выводы:

1. Понижение температуры нагрева прокатываемого металла вызывает повышение удельного расхода энергии на прокатку, и наоборот.

2. Удельный расход энергии с понижением температуры нагрева у стали средней твердости повышается в меньшей степени, чем у твердой стали, по сравнению с мягкой сталью. С повышением же температуры нагрева удельный расход энергии у стали средней твердости снижается в такой же степени, а у твердой стали — в большей степени, чем у мягкой стали.

3. Для одного и того же типичного случая и одной и той же температуры нагрева в 1100° сталь средней твердости (С—0,44%) потребляет примерно на 74% больше, а очень твердая сталь (С—0,92%) примерно на 4% меньше энергии по сравнению с мягкой сталью (С—0,15%).

4. При всех прочих равных условиях удельный расход энергии для случая (2) примерно на 22%, а для случаев (3) и (4) на 80% больше, чем для случая (1).

Исследования кафедры прокатки Днепропетровского металлургического института (см. ниже сноску 8) показали, что в пределах температур 1000—1200° снижение температуры в среднем на 180° дало повышение удельного расхода энергии на прокатку на 85%, т. е. в указанном интервале температур изменение температуры на 1° вызывает изменение расхода энергии на 0,47%, при этом указывается, что эта величина меньше обычно принимаемой по литературным данным 0,7—1%[3].

В основном влияние температуры прокатываемого металла на удельный расход энергии может быть резюмировано следующими положениями:

1. Температура нагрева металла имеет громадное влияние на величину удельного расхода энергии при его прокатке.

2. Для каждой марки стали в зависимости от ее состава существует оптимальная с технологической точки зрения температура. Работа при этих температурах может дать значительную экономию энергии. В частности, важным моментом является ускорение процесса прокатки.

Охлаждение прокатываемого изделия на пути от нагревательной печи к стану должно быть сведено к минимуму.

Качество (состав) прокатываемого металла. Так как между удельным давлением на валки и работой прокатки имеется определенная зависимость, то качество металла не может не оказывать влияния на расход энергии при прокатке.

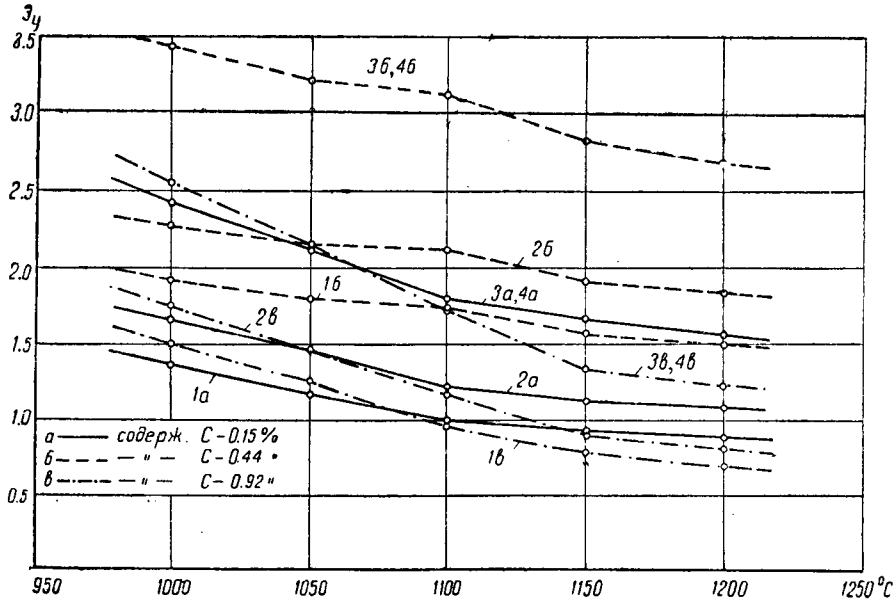


Рис. 2.

1 — случай 1-й, *2* — случай 2-й, *3* — случай 3-й, *4* — случай 4-й

[3] По нашим вычислениям, на основе которых построен график рис. 2, каждый градус снижения температуры прокатки ниже 1100° вызывает повышение удельного расхода энергии от 0,1 до 0,51%, в зависимости от качества металла и рода профиля.

Это подтверждается рядом исследований, на которых мы здесь за недостатком места остановиться не можем, укажем лишь на работу Рона [4], в которой эта зависимость проявляется в наиболее наглядной форме. На рис. 3 показан график нагрузки непрерывного стана при прокатке одного и того же профиля, одного и того же начального и конечного сечения из различных сортов стали. Эти графики, площадь которых представляет собой в известном масштабе расход энергии на прокатку, ясно показывают, что при одной и той же температуре прокатки расход энергии меняется в зависимости от состава стали в очень широких пределах.

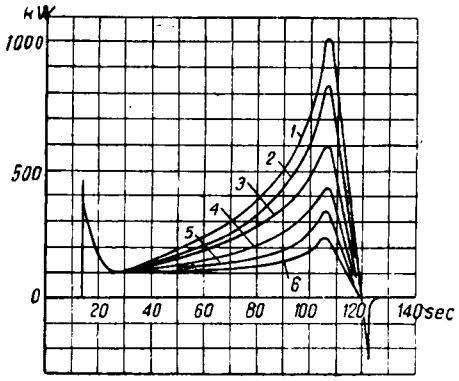


Рис. 3

1 – 15% Cr, 62% Ni, 7% Mo; *2* — 20% Cr, 80% Ni; *3* — 17% Cr, 63% Ni; *4* — 50% Ni; *5* — Ni; *6*—Fe, температура прокатки 1260°

На основе этих и прочих цитированных данных, можно считать твердо установленным, что качество (состав) металла имеет определенное влияние на величину удельного расхода энергии при его прокатке. К сожалению, имеющийся в настоящее время по этому вопросу материал не дает еще возможности установить качественное и особенно количественное влияние отдельных элементов состава металла на этот удельный расход энергии и в этом отношении требуется еще большая экспериментальная работа.

Сортамент прокатываемых изделий. При прокатке металлов сортамент (форма сечения, отношение ширины к высоте, вес на единицу длины и т. п.) может иметь влияние на удельную величину не только общей работы прокатки, но, что на первый взгляд кажется странным, и чистой работы прокатки. Это легко усмотреть из выражений для составляющих чистой работы прокатки (формулы 2 по 5') путем простых их преобразований.

Теоретическое определение изменения удельного расхода энергии в зависимости от сортамента при условии, что будут известны величины, определяющие составные элементы работы прокатки, возможно только для каждого конкретного случая особо, так что свести эту зависимость к какой-либо единой формуле не представляется возможным. Поэтому здесь приходится руководствоваться, главным образом, опытными данными.

Не останавливаясь подробно на материалах, которые нам удалось собрать по этому вопросу, приведем лишь данные Верта (график рис. 4), полученные им в результате опытов, специально предназначенных выявлению влияния сортамента на удельный расход энергии при прокатке [5]. Опыты эти подтверждают вышеизложенные выводы из теоретических зависимостей для чистой работы прокатки.

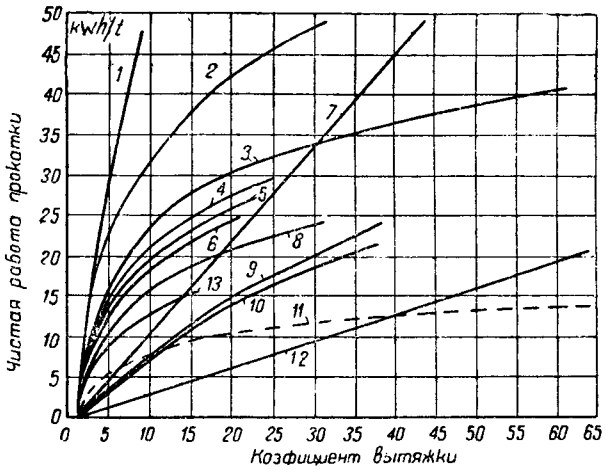


Рис. 4.

1 — тонколистовое, *2* — обручное, *3* — легкие прутья, *4* — балки, *5* — рельсы, *6* — швеллера, *7* — проволока тонкая, *8* — сутунка, *9* — листы, *10* — заготовка, *11* — по формуле Финка, *12* — проволока толстая, *13* — круглая

Богатый материал об удельном расходе энергии на процесс прокатки собрали американские электротехнические фирмы, которые уже давно перешли к статистическим методам определения силовых факторов, связанных с этим процессом. Анализ этого материала как по литературным данным, так и по данным проектных организаций [6], также вполне подтверждает указанный нами характер влияния отдельных элементов сортамента прокатываемых изделий на удельный расход энергии.

У нас в СССР, начиная примерно с 1930 г., Харьковским институтом металлов [7] и Днепропетровским металлургическим институтом [8] выполнен был ряд интересных работ о влиянии сортамента (и других факторов) на удельный расход энергии при прокатке. Вследствие недостатка места мы дадим здесь только краткое резюме тех выводов, к которым пришли эти исследователи, с точки зрения интересующих нас зависимостей. Количественные значения удельных расходов энергии, полученные в результате исследований ХИМ, хорошо совпадают с американскими данными для примерно аналогичных условий. Сопоставление удельного расхода энергии на прокатку различных профилей показывает закономерное повышение этого расхода с уменьшением сечения профиля. Исследования ДМИ также дали ряд интересных выводов в отношении влияния профиля. В основном подтвердились вышеприведенные выводы наши, в особенности относительно влияния величины $\frac{h}{D}$.

[4] W. Rohn, Kontinuirliche Walzenstrasse für Werkstoff mit hoher Warmfestigkeit, St. u. Eis. № 49, 1929, S. 1757, и № 50, S. 1793.

[5] A. Werth, Kraftbedarfsstudien in durchlaufenden elektrisch angetriebenen Walzenstrassen, St. u. Eis. № 48, 1928, S. 1670.

[6] Подробный анализ этого материала дан в вышецитированной работе нашей. Выдержки из данных фирмы GEC помещены в нашей книге «Энергетика заводов черной металлургии».

[7] См. журналы: „Домез" № 10—11, 1930, «Сталь» № 5, 6 и 8, 1931, № 9, 1932.

[8] См. журналы: „Домез" № 4—5, 1935, «Теория и практика металлургии» № 7, 8 и 11, 1936, № 4, 7, 1937 и др.

Из изложенного в этом разделе можно сделать заключение, что с энергетической точки зрения можно рекомендовать технологам прокатывать определенный профиль на стане с минимально допустимым диаметром валков.

Калибровка прокатных валков. Хотя калибровка прокатных валков находится в тесной зависимости от профиля прокатываемого изделия, а следовательно, и от его сортамента, тем не менее мы сочли целесообразным выделить рассмотрение этого фактора, так как и для одного и того же профиля в зависимости от калибровки удельный расход энергии может колебаться в более или менее широких пределах.

Так, Коттель[9] на основе экспериментов Пуппе нашел, например, что при прокатке балок в фасонных калибрах в зависимости от величины бокового давления чистая работа прокатки может снижаться на 25%.

Экспериментальное исследование этого вопроса попутно с другими факторами находим в работе Гофф и Даль[10], причем оказалось, что при прочих равных условиях в зависимости от калибровки и марки стали удельная чистая работа прокатки снижалась на 33—39%.

Интересные данные по этому вопросу находим и в цитированной уже работе ДМИ. Ожидаемое снижение удельного расхода энергии на прокатку листов на толстолистовом стане трио Лаута путем более рациональной калибровки при практически прочих равных условиях составляет 21,3%.

Все это подтверждает правильность вышеотмеченного нами значительного влияния калибровки на удельный расход энергии. Технологи и энергетики уделяют мало внимания этому вопросу. Между тем в ряде случаев на этом участке может быть обеспечена значительная экономия энергии.

Влияние рода и типа приводного двигателя, а также типа и конструкции стана

Выбор приводного электродвигателя в основном диктуется типом и конструкцией прокатного стана, и практика настоящего времени уже выработала в этом отношении вполне определенные руководящие указания. Нельзя, следовательно, рассматривать этот вопрос изолированно от вопроса о выборе типа прокатного стана для выработки определенной продукции. Поэтому нам придется предварительно рассмотреть вопрос о выборе типа стана, тем более, что от этого выбора зависит удельный расход энергии на прокатку не только в связи с тем, что он в значительной мере предопределяет выбор приводного электродвигателя, но и потому, что сам по себе тип прокатного стана может повлиять на величину удельного расхода энергии для прокатки определенного изделия.

Реверсивные станы. К ним в основном относятся всякого рода обжимные станы (блюминги, слябинги и т. п.), некоторые типы станов для листов большой и средней толщины и т. п.

Как общее правило, такие станы приводятся в движение элекродвигателем постоянного тока, питаемым от особого мотор-генератора, снабженного маховиком Ильгнера, по схеме Вард-Леонарда. Схема эта бесспорно имеет ряд ценных преимуществ с точки зрения легкости, быстроты и гибкости управления двигателем, однако с точки зрения удельного расхода энергии на прокатку она не может считаться совершенной, так как она связана со сравнительно значительными дополнительными потерями: а) в асинхронном двигателе агрегата Леонард—Ильгнер, б) в регуляторе скольжения этого двигателя, в) в генераторах постоянного тока агрегата и г) на трение маховика Ильгнера в подшипниках и в воздухе.

Посмотрим предварительно, какими мероприятиями могут быть снижены указанные потери при сохранении типа стана и схемы питания приводного электродвигателя.

В ряде случаев, когда агрегат питается от мощной заводской электроцентрали (Магнитогорский, Кузнецкий заводы) или от мощной районной сети (Запорожсталь, ряд заводов Донбасса), можно отказаться от маховика Ильгнера. Эффект, который может от этого получиться, заключается в отпадении не только потерь, вызываемых самим маховиком Ильгнера, но и в возможности применить в качестве приводного двигателя синхронный вместо асинхронного, благодаря чему отпадут потери в регуляторе скольжения; кромя того, и к. п. д. самого двигателя будет выше.

Наши ориентировочные расчеты показывают, что это может дать снижение расхода энергии у нашего стандартного блюминга примерно на 10%.

Целесообразность отказа от маховика Ильгнера[11] осознана нашими проектирующими организациями и начинает уже проводиться в жизнь (черновая клеть среднелистового стана Запорожстали, универсальный стан завода им. Дзержинского и др.).

В качестве другой актуальной проблемы по рассмотренному вопросу следует указать на большой экономический эффект, который могла бы дать замена мотор-генератора системы Леонард—Ильгнер ртутно-выпрямительной установкой с сеточным управлением. Что такая возможность вполне реальна, доказывается осуществленными аналогичными установками меньших мощностей. Следовательно, весь вопрос в усилении научно-исследовательской работы на эту тему.

Интересно отметить, что иностранные фирмы уже разработали подобные проекты для питания реверсивных электродвигателей мощности в 5000 kW и выше[12], причем подсчеты показали, что чем больше мощность двигателя, тем больше выгода замены агрегата Леонард — Ильгнера ртутны-

[9] E. Cottel, Die Grundlagen des Walzens, 1930 (имеется русский перевод).

[10] H. Hoff u. T. Dall, Kraftbedarf beim Grobwalzen von Blöcken, St. u Eis. № 45, 1935, S. 1182.

[11] Что было предложено нами еще в 1932 г. (см. „Домез" № 3, 1932).

[12] K. Baudisch u. F. Müller, Stromrichter im Walzwerk, Siem.-Z. № 5, 1935, S. 226.

ми выпрямителями. Затруднения предвидятся, главным образом, в невозможности сглаживать пики мощности, как в агрегате Леонард — Ильгнера, но мы уже отмечали, что для наших энергетических систем, мощность которых в дальнейшем будет еще возрастать, этот вопрос не может создавать непреодолимых трудностей.

Нереверсивные нерегулируемые станы. Станы, работающие без маховика. С точки зрения наименьшего удельного расхода энергии все клети нерегулируемого, нереверсивного стана, если он работает без маховика, должны вращаться синхронным двигателем.

Станы, работающие с маховиком. Прежде всего необходимо отметить, что если у наших новых прокатных станов маховики применяются, вероятно, только на основе надлежащего расчета, то на ряде старых станов наших металлургических заводов маховики ставились, так сказать, по традиции. Между тем не приходится доказывать, что при несоответствующем графике нагрузки маховик не только не приносит пользы, но может оказаться вредным, вызывая излишнюю трату энергии на его вращение[13].

Выбрав большие угловые скорости, т. е. посадив маховик на вал редуктора (при наличии последнего), соединяемый с электродвигателем, можно получить требуемый запас кинетической энергии при значительно меньшем моменте инерции, т. е. при меньших весе и диаметре маховика. С уменьшением же веса и диаметра маховика уменьшаются потери на трение в подшипниках и вентиляционные. Для иллюстрации этого положения приведем пример из практики одного завода. На чер новом стане 650 с приводным двигателем в 2500 л. с. непосредственно на валу стана насажен был маховик, который, несмотря на свой большой вес в 104 t, давал, как показали измерения, очень слабый выравнивающий эффект. Тогда на вал двигателя, соединенного со станом посредством редуктора с передаточным отношением 5:1, насажен был маховик весом всего около 30 t, но маховый эффект которого был в 2,5 раза больше, чем прежнего маховика в 104 t[14].

В качестве приводного двигателя, при наличии у рассматриваемого типа станов маховика, в нормальных условиях, т. е. когда основным родом тока на заводе является трехфазный ток, следует применять асинхронный двигатель. Требуемое изменение скольжения может быть достигнуто либо постоянно включенным в роторную цепь неизменным сопротивлением либо периодически включаемым и выключаемым сопротивлением, что достигается помощью особого автоматического регулятора скольжения.

Сравнительные подсчеты, которые были проведены для нереверсивного стана, требующего среднюю мощность около 1200 л. с., при средней скорости 183,5 об/мин, показали, что[15]:

1. Применение маховика без автоматического регулятора скольжения, снижая номинальную мощность двигателя, по сравнению с работой без маховика одновременно вызывает снижение производительности стана (в данном случае на 8,6%) вследствие увеличенного скольжения и повышение потерь в двигателе на 30%, причем здесь не учтено увеличение удельных потерь вследствие указанного уменьшения производительности стана.

2. Автоматический регулятор скольжения должен выбираться с таким расчетом, чтобы производительность стана была близка к той, которая получилась бы при работе без маховика.

Приведенные данные показывают, как осторожно надо подходить к вопросу о применении маховика, вопреки распространенной практике ставить маховик почти у всех нереверсивных станов, где применим асинхронный приводной двигатель.

Нереверсивные регулируемые станы. Станы, работающие без маховика. Выбор типа приводного электродвигателя предопределяется требуемыми пределами регулирования. Если эти пределы не превышают 50% вниз от синхронизма, то, как общее правило, выгодно будет применить каскад Кремера. Для регулирования на ± 20—25% вниз и вверх от синхронизма подходит каскад Шербиуса.

Существующие по вопросу относительной энергетической экономичности этих систем данные показывают, что при одинаковых условиях работы обе схемы с точки зрения их энергетической экономичности приблизительно равноценны. Следовательно, выбор между ними должен производиться на основе других соображений (первоначальные капиталовложения и т. п.).

Там, где требуемые пределы регулирования превышают вышеуказанные для каскадных схем, что имеет место у большинства непрерывных станов, единственно пригодным двигателем является электродвигатель постоянного тока, допускающий регулирование числа оборотов в пределах 1:3 и выше, и здесь мероприятием, могущим улучшить к. п. д. электроустановки, в целом также является упомянутое выше применение в качестве преобразователя ртутного выпрямителя с сеточным управлением.

Идея целесообразности такой замены возникла в технических кругах уже давно и иллюстрируется она диаграммой рис. 5, относящейся к напряжению 825 V, т. е. напряжению, применяемому для рассматриваемой нами цели[16].

Чтобы судить об энергетической экономичности применения ртутных выпрямителей в прокатном производстве, приведем некоторые интересные данные, заимствованные из иностранной технической литературы[17].

---

[13] В частности, это подтвердилось при исследовании работы стана косой вальцовки Маннесмана на заводе им. Карла Либкнехта в Днепропетровске.

[14] E. Courtin, Entwicklung der elektrotechnischen Einrichtungen auf Hüttenwerken, Ber. № 35 des Maschinenausschusses des V. D. Eisenhüttenleute

[15] К. О. Розен, Электрический привод прокатных станов.

[16] F. Müller, Ausgewählte Kapitel aus dem Anwendungsgebiete der Elektrotechnik. Ber. № 34, d. Maschinen ausschusses d. V. D. Eisenhüttenleute.

[17] R. Bingel, Entwicklung d. elektrischen Rüstzeuges für die Industrie, St. u. Eis. № 1, 1935.

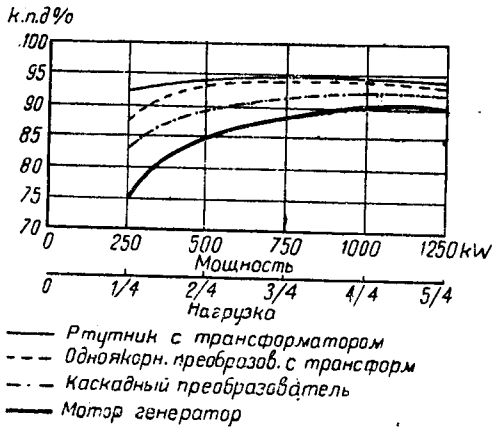


Рис. 5

У реверсивного стана в зависимости от производительности и системы питания приводного двигателя удельный расход энергии на 1 t металла составляет:

Система питания	Производительность в час	
	30 t	90 t
Леонард—Ильгнер . .	45 kWh	38 kWh
Чистый Леонард . . .	35 „	31 „
Ртутный выпрямитель .	28 „	26 „

Вышеприведенные данные относятся к реверсивным станам. У нереверсивных станов сравнение энергетической экономичности можно делать между ртутным выпрямителем и чистым Леонардом, причем в пользу первого получается еще очень существенная выгода, выражаемая примерно 45%. Если эта цифра, возможно, и преувеличена, то во всяком случае порядок ее с достаточной очевидностью подтверждает всю актуальность замены других систем питания приводных двигателей постоянного тока у прокатных станов питанием от ртутного выпрямителя.

В заключение этого раздела остановимся еще несколько на влиянии типа и конструкции стана на удельный расход энергии при прокатке.

Блюминги и слябинги. Здесь вместо общераспространенного дуо-реверсивного типа возможно применение трио-стана или непрерывного стана.

Стан-трио. С точки зрения энергетической экономичности этот тип стана представляется более экономичным, так как у него отпадают сравнительно значительные потери энергии на ускорение и замедление движущихся масс при каждом пропуске, которые при применении электродинамического торможения снижаются до 8—10%. Но и эта цифра вполне оправдала бы замену дуореверсивного стана станом трио, если бы не некоторые недостатки последнего, снижающие его производительность, как-то: необходимость подымать и опускать слиток после каждого пропуска и т. п. Таким образом у современных блюмингов и слябингов, у которых громадная производительность является основным их преимуществом, трио-станы вряд ли имеют шансы конкурировать с дуо-реверсивными станами. При малых же производительностях трио-станы нашли применение в качестве обжимных станов.

Непрерывные станы. Имеется всего несколько непрерывных блюмингов в США (Завод Индиана Стил Ко, завод Форда). Хотя и у этого типа станов отпадают потери на ускорение и замедление движущихся масс, тем не менее есть все основания полагать, что дополнительные потери на трение, вызываемые наличием лишних трех клетей, и на холостой ход их поглотят выгоду от отсутствия потерь на ускорение и замедление. Таким образом с точки зрения энергетической экономичности этот тип станов преимуществ не представляет.

Одношпиндельные станы. В ряде случаев одношпиндельные станы могут с успехом заменить многошпиндельные, давая при этом ряд преимуществ как с точки зрения снижения капитальных затрат, так и в отношении снижения расхода энергии [18].

Учитывая, что в шестеренных клетях теряется не менее двух, а в среднем 3,5% от мощности приводного двигателя, предложение о выполнении ряда станов в виде одношпиндельных заслуживает и с точки зрения энергетической должного изучения. Правда, известный дополнительный расход энергии требуется на привод холостых валков, но этот дополнительный расход может ориентировочно быть оценен в $^1/_2$% от мощности приводного двигателя, так что остается еще существенная выгода.

Наконец, с точки зрения уменьшения сопротивления металла деформации, а следовательно, и расхода энергии на процесс прокатки выгодно работать с валками минимального диаметра, что конструкторами станов часто недоучитывается. В этой связи приобретает интерес идея более широкого применения многовалковых станов.

Усовершенствование оборудования. Заслуживает внимания применение особого типа и состава подшипников для валков прокатных станов и соответствующей смазки для них.

Искания в этом направлении были начаты давно. Первые более или менее полные сведения о влиянии типа подшипников и смазки на удельный расход энергии при прокате были начаты примерно в 1924 г.

Примененный для одного обручного прокатного стана новый смазочный материал, выбранный на основе лабораторных исследований, дал низкий коэфициент трения и значительную экономию в удельном расходе энергии на прокатку. Так, раньше этот удельный расход для данного стана составлял в среднем около 70 kWh/t, после же введения этого смазочного материала удельный расход снизился до ~58 kWh/t.

В дальнейшем произведены были опыты с баббитом, применение которого до того считали невыгодным вследствие его дороговизны. Опыты, однако, показали, что при тех же примерно расходах на вкладыши потери энергии на трение снизились приблизительно на 25% при одновременном повышении суточной производительности блюминга с 1600 до 2000 t.

---

[18] См., например, „Советская металлургия“ № 7, 1936, стр. 49.

Ряд данных из американских фирменных источников[19] указывает, что подбором надлежащей смазки достигнута экономия удельного расхода энергии от 14 до 25%. Роликовые подшипники у прокатных станов получили широкое применение главным образом в США.

По данным шведской фирмы SKF установка роликовых подшипников на проволочном стане дала снижение расхода энергии по сравнению с подшипниками скольжения на различных линиях стана от 35 до 42,4%, а на среднесортном стане — от 40,3 до 50,5%.

Хотя преимущество роликовых подшипников с точки зрения снижения потери энергии на трение не может быть оспариваемо, тем не менее они обладают и недостатками как в отношении их высокой стоимости, так и в отношении затруднительности их разборки и сборки там, где требуется частая смена валков. Поэтому искания шли по пути усовершенствования более простых подшипников скольжения применением более стойких, дешевых и в то же время достаточно антифрикционных материалов.

Так например, металлургические заводы фирмы Vereinigte Stahlwerke начали применять деревянные вкладыши в бронзовом остове и оказалось, что, несмотря на неприменение смазочных материалов (требуется только поливка водой), получилась существенная экономия энергии. На металлургическом заводе Фелькинген применение деревянных подшипников у одного стана дало снижение мощности холостого хода с 200—250 kW до 80—150 kW. Там же применили для этих подшипников смазку под давлением, что снизило удельный расход энергии на обжимном стане с 45 до 33—35 kWh/t.

Идя дальше по пути исканий наиболее рационального материала для подшипников валков прокатных станов, техническая мысль обратилась к использованию для этой цели пластических материалов. Проведенными в этом направлении опытами было установлено, что весьма удовлетворительные результаты как с точки зрения сопротивления износу, так и по своим антифрикционным свойствам дает текстолит, и этот материал получает все большее распространение для подшипников валков прокатных станов и у нас и за границей.

В СССР в порядке опыта в производственных условиях текстолитовые подшипники на прокатных станах были впервые применены на заводе «Серп и молот» в Москве. Полученные там благоприятные результаты побудили и ряд других наших металлургических заводов применить текстолитовые подшипники для прокатных станов, причем повсюду они удовлетворяют предъявленным к ним требованиям.

В обстоятельном исследовании о текстолитовых подшипниках, выполненном на металлургическом заводе в Сталино (Донбасс), указывается, что расход энергии в железопрокатном цехе, в котором в декабре 1934 г. бронзовые подшипники были заменены текстолитовыми, удельный расход энергии на 1 t проката на стане 350 mm снизился со 131 kWh/t в 1933 г. до 102 kWh/t в 1935 г., т. е. на 22%.

Большой интерес представляет опыт свыше двухлетней работы блюминга 900 mm Златоустовского завода на текстолитовых подшипниках. До этого опыта существовало мнение, что текстолит может быть применен только на сортовых станах с диаметром валков до 600 mm, между тем практика Златоустовского завода полностью опровергла это мнение.

Ориентировочные подсчеты, произведенные нами на основе данных о работе этого блюминга на текстолитовых подшипниках, показали, что снижение расхода энергии на прокатку по сравнению с прежними металлическими подшипниками составляет около 37,5%.

В настоящее время текстолитовые подшипники с успехом применяются и на блюмингах других наших крупных заводов (Магнитогорском, Кузнецком и др.).

По данным ГУМП на Кузнецком металлургическом заводе экономия энергии за 1937 г. на блюминге 1100, стане 800 и листопрокатном стане в связи с переводом их на текстолитовые подшипники достигает 15 млн. kWh. На рельсобалочном стане того же завода после его перевода на текстолитовые подшипники производительность стана поднялась с 95 до 134 тыс. t, в связи с чем удельный расход энергии снизился с 45 до 36,4 kWh/t.

Влияние использования оборудования

Предположим, что стан в течение всего рассматриваемого промежутка времени T работал производительно и выпустил G kg продукции, тогда удельный расход энергии на 1 kg продукции будет:

$$\mathcal{Э}_y = \frac{\mathcal{Э}}{G},$$

где $\mathcal{Э}$ — общий расход энергии, потребленной станом за рассматриваемый промежуток времени T.

Величина $\mathcal{Э}$ в kWh определится произведением из средней нагрузки стана P в kW на время T часов, но (см. выше):

$$P = P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4.$$

Следовательно:

$$\mathcal{Э} = PT = (P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4)\,T.$$

Примем сначала для упрощения наших выкладок, что речь идет о нереверсивном стане (P_4' отпадает) и что $T = 1$ h, тогда:

$$\mathcal{Э}_y = \frac{P_0 + P_1 + P_2 + P_3}{G_{час}} = \mathcal{Э}_{y0} + \mathcal{Э}_{y1} + \mathcal{Э}_{y2} + \mathcal{Э}_{y3}.$$

Рассмотрим сначала, в какой мере производительность стана (находящаяся в определенной зависимости от его использования) может повлиять на величину отдельных слагаемых P.

Прежде всего необходимо установить, что максимально возможная часовая производительность стана:

$$G_{час} = 3600\, V_c\, \gamma,$$

где V_c — секундный объем прокатываемого металла, γ — удельный вес металла.

[19] К которым, следовательно, следует относиться с известной осторожностью.

Но

$$V_c = bhv$$

(см. уравнение (3), откуда видно, что производительность стана находится в определенной зависимости от площади прокатываемого сечения и скорости прокатки.

Энергия холостого хода $Э_{y0}$ по самому своему определению не должна зависеть от производительности стана. Однако поскольку производительность стана наряду с другими факторами зависит от скорости прокатки, мощность же холостого хода также, разумеется, зависит от этой скорости, то существует косвенная зависимость между производительностью стана и мощностью холостого хода. Эта зависимость несколько усложняется при наличии у стана маховика, однако, поскольку мощность холостого хода составляет сравнительно незначительную часть общей мощности, потребляемой прокатным станом, мы в первом приближении будем считать мощность холостого хода независимой от производительности стана.

Таким образом имеем:

$$Э_{y0} = \frac{P_0}{G_{час}} . \qquad (9)$$

Энергия деформации $Э_{y1}$:

$$Э_{y1} = \frac{P_1}{G_{час}} = \frac{kp}{3600} \cdot \frac{H-h}{h} . \qquad (10)$$

Таким образом при определенных начальной и конечной высоте прокатываемой полосы величина $Э_{y1}$ может быть принята постоянной.

Энергия трения металла в валках $Э_{y2}$. Из уравнения 4′:

$$Э_{y2} = \frac{P_2}{G_{час}} = \frac{A_2}{3600\, iS\gamma} . \qquad (11)$$

Величина A_2, как видно из уравнения (4), также зависит от начального и конечного сечения (находящихся в определенной зависимости от начальной и конечной длины) прокатываемой полосы и от ряда других факторов, которые для определенного профиля являются величинами неизменными, поэтому и величина $Э_{y2}$ практически может быть принята постоянной.

Энергия дополнительного трения $Э_{y3}$:

$$Э_{y3} = \frac{P_3}{G_{час}} = \frac{C'}{3600\gamma S} , \qquad (12)$$

т. е. практически также постоянная величина.

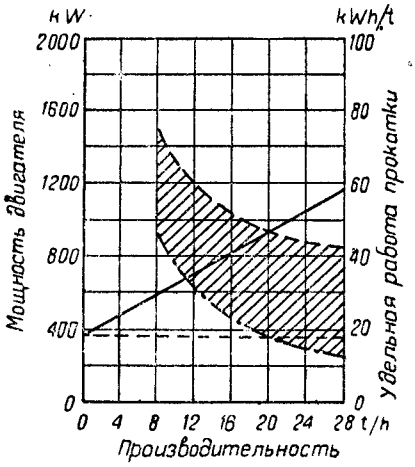
Следовательно, можем написать:

$$Э_y = \frac{P_0}{G_{час}} + C_1 + C_2 + C_3 = \frac{P_0}{G_{час}} + C. \qquad (13)$$

Таким образом зависимость удельного расхода энергии от производительности стана в идеальном случае, когда весь промежуток времени T стан будет работать производительно, примет вид:

$$y = \frac{C_0'}{x} + C, \qquad (13')$$

т. е. получаем уравнение равнобокой гиперболы, как это видно и из графика рис. 6, кривая *1*. У реверсивных станов, как уже указывалось, должна быть учтена еще мощность и соответственно энергия, расходуемая на ускорение и торможение движущихся масс.



— — Общая работа прокатки
····· Работа холостого хода
– – – Удельная общая работа прокатки
— · — Удельная работа холостого хода

Рис. 6. Заштрихованная площадь представляет собой удельную чистую работу прокатки

Все вышеперечисленные составляющие удельного расхода энергии относятся к энергии, потребляемой только прокатным станом, т. е. к соединительной муфте между станом и приводным двигателем. К этой величине $Э_y$ должны быть прибавлены потери в приводном двигателе как при работе стана вхолостую, так и с нагрузкой.

Все вышесказанное относительно удельного расхода энергии применимо, как указано, только к идеальному случаю производительной работы стана в течение всего времени T, нахождения его в эксплоатации. В действительности у прокатных станов в силу характера всего технологического процесса неизбежны перерывы (паузы) между пропусками изделия через валки, когда стан работает вхолостую.

Влияние пауз может быть учтено особым коэфициентом, а именно: k_1 — коэфициент полезного использования стана, т. е. отношение времени полезной работы стана к общему времени нахождения стана в действии и время полезной работы стана в течение одного часа будет:

$T_p = k_1$, а время работы его в холостую $T_0 = 1 - k_1$. Тогда удельный расход энергии на 1 t проката:

$$Э_y = \frac{P_0 + k_1 P_ч}{k_1 G_{час}} , \qquad (14)$$

где $G_{час}$ — весовое количество изделий, прокатываемых за 1 h непрерывной производительной работы стана.

Величина $G_{час}$ при определенном исходном весе $G_{сл}$ слитка (или заготовки) будет зависеть от продолжительности t_p полезной работы стана в течение одного цикла прокатки, т. е.:

$$G_{час} = \frac{3600}{t_p} G_{сл}.$$

Имеем также:

$$Э_y = \frac{P_0 + k_1 P_ч}{n_ц G_{сл}}, \qquad (14а)$$

где $n_ц$ — число циклов прокатки или, что то же, число прокатываемых слитков в течение одного часа нахождения стана в эксплоатации.

Обозначив $\frac{3600}{t}$ через k_2, имеем:

$$n_ц = k_1 k_2. \qquad (14б)$$

Посмотрим, как будет меняться величина $Э_y$ в зависимости от соотношения величин P_0 и P и k_1 и k_2 при определенных $G_{час}$ и $n_ц$.

Изобразим соответствующие подсчеты в виде графика рис. 7.

Из этого графика видно, что при неизменной величине k_2, принятой за единицу, и меняющейся величине k_1 от 1,0 до 0,2, т. е. в пределах тех колебаний, которые могут встретиться в обычной практике прокатных цехов, удельный расход энергии в зависимости от соотношения P_0 и P повышается на 160%, что указывает на большое значение хорошего использования прокатных станов для снижения удельного расхода энергии на единицу их продукции.

Из уравнения (14), видно, что снижение $Э_y$ при определенном отношении $P_0 : P$ может произойти либо за счет повышения значения коэфициента k_1 либо за счет повышения величины $G_{сл}$.

Повышение коэфициента k_1. Уравнение (14а) и составленный на его основе график рис. 7 показывают, что при неизменных величинах k_2 и $G_{сл}$ величина коэфициента k_1 может иметь большое влияние на величину $Э_y$, причем повышение k_1 дает снижение $Э_y$. Но взаимозависимость между k_1 и $Э_y$ усложняется вследствие того, что k_1 косвенным образом влияет и на величину k_2, как это видно из уравнения (14б), по которому:

$$k_2 = \frac{n_ц}{k_1}.$$

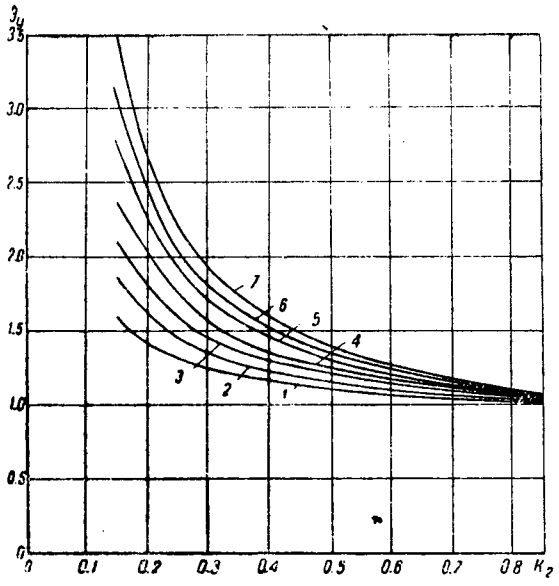


Рис. 7.

Отношение $\frac{P_0}{P_1} = 0{,}10$, соответственно $2 = 0{,}15$; $3 = 0{,}20$; $4 = 0{,}25$; $5 = 0{,}30$; $6 = 0{,}35$; $7 = 0{,}40$

Следовательно, при неизменной величине $n_ц$ повышение k_1 влечет за собой соответствующее снижение k_2, а вместе с тем увеличение $Э_y$, что, впрочем, ясно из уравнения (14а), где коэфициент k_1 из знаменателя исчез и входит только в числитель. Для того чтобы увеличение k_1 дало то снижение $Э_y$, которое получается по графику рис. 7, необходимо, чтобы $n_ц$ возрастало в том же соотношении, как и k_1.

Но:

$$n_ц = \frac{3600}{t_ц},$$

где $t_ц$ — продолжительность одного цикла прокатки в секундах. С другой стороны:

$$t_ц = t_p + t_n,$$

где t_n — продолжительность пауз в течение одного цикла и:

$$k_2 = \frac{t_p}{t_ц} = \frac{t_p}{t_p + t_ц} = \frac{1}{1 + \frac{t_n}{t_p}}.$$

Следовательно, уравнение (14а) может быть переписано:

$$Э_y = \frac{P_0\left(1 + \frac{t_n}{t_p}\right)}{\frac{3600}{t_p} G_{сл}} + \frac{P_r}{\frac{3600}{t_p} G_{сл}}.$$

Из этих уравнений видно, что для максимального снижения величины $Э_y$ необходимо одновременно соответствующее снижение как t_p, так и t_n. С другой стороны, важно отношение t_n к t_p: при определенной величине t_p важно, чтобы t_n было минимальным. В пределе при $t_n = 0$ величина $Э_y$ будет минимальной, а при $t_p = 0$ $Э_y$ обратится в бесконечность, т. е. получаются те же зависимости, как и выше из графика рис. 7.

Максимальное снижение t_p возможно за счет соответствующего увеличения либо обжатий либо скорости прокатки. И то и другое связано с соответствующим увеличением мощности прокатки, а следовательно, и абсолютного расхода энергии.

Наивыгоднейшая величина t_p с точки зрения наименьшей величины $Э_y$ должна определяться в каждом конкретном случае особо, с учетом всех вышеуказанных факторов. Для первого приближения можно воспользоваться данными графика рис. 7.

Что касается величины t_n, то максимальное снижение ее, требуемое для снижения $Э_y$, возможно не у всякого типа станов.

У нереверсивных станов, работающих с маховиком, снижение длительности пауз может иметь следствием невозможность для маховика в достаточной мере зарядиться, что даже при достаточно мощном приводном электродвигателе повлечет за собой соответствующее увеличение среднеквадратичной мощности его за цикл, следовательно, и удельного расхода энергии.

У реверсивных станов к паузам относится время разгона стана и время торможения его вхолостую, но сокращение этого времени связано с соответствующим увеличением вращающего момента, а следовательно, и среднеквадратичной величины мощности за цикл и в конечном итоге — и удельного расхода энергии.

Поэтому сокращение пауз у станов обоих этих типов может с точки зрения снижения удельного расхода энергии дать положительный эффект лишь после надлежащего расчета с учетом указанных факторов другие исследователи нашли:[20]

При увеличении использования (производительности) стана:

а) агрегаты, имеющие меньшие постоянные времени, дают большее снижение удельного расхода энергии, чем агрегаты с большими тяжелыми маховиками и приспособлениями для искусственного буферования;

б) явление снижения удельного расхода энергии более заметно у станов с относительно большими величинами нагрузки (с большим отношением $\frac{P}{P_0}$).

Последний вывод автора вполне согласуется с найденными нами зависимостями (см. график рис. 7).

На многих металлургических заводах наблюдаются еще холостые хода, связанные с организационными неполадками, которые снижают значение коэфициента k_1 и влекут существенные перерасходы энергии. Борьба с этими потерями может дать значительный эффект.

Производительность стана. Этот фактор, выражаемый в уравнении (13) величиной $G_{час}$, прямо пропорционален, как мы видели, секундному объему прокатываемого металла, а этот объем находится в прямой зависимости от средней площади сечений прокатываемой полосы и от скорости прокатки.

Площадь сечения прокатываемой полосы: средняя величина ее при заданном конечном сечении будет тем больше, чем больше было начальное сечение. Но с точки зрения энергетической вопрос усложняется, так как при большем исходном сечении, при одинаковой производительности требуются большие обжатия, что влечет за собой соответствующее увеличение мощности приводного двигателя.

Скорость прокатки. Влияние увеличения производительности стана путем увеличения скорости прокатки на удельный расход энергии нуждается в экспериментальной проверке. Теоретически увеличение скорости прокатки влечет за собой пропорциональное увеличение чистой мощности прокатки, пропорциональное увеличение мощности холостого хода стана и, кроме того, определенное увеличение потерь холостого хода приводного электродвигателя; удельное сопротивление деформации возрастает с увеличением скорости прокатки. Таким образом непосредственно этот фактор в ряде случаев не может дать снижения удельных расходов.

Зато увеличение скорости прокатки может иметь косвенное положительное влияние на снижение удельного расхода энергии, так как благодаря этому прокатываемая полоса меньше остывает, и прокатка может вестись при большей средней температуре металла. Количественное влияние этого фактора на снижение удельных расходов должно быть проверено экспериментально.

Величина обжатий. Увеличение производительности стана может произойти, как это уже указывалось нами, и за счет увеличения обжатия прокатываемой полосы. Однако увеличение обжатий хотя сокращает машинное время прокатки, но одновременно вызывает повышение чистой мощности прокатки, что, разумеется, отражается и на удельном расходе энергии. Указанная взаимосвязь между обоими этими факторами выражается весьма сложной зависимостью, которая может быть определена в каждом конкретном случае отдельно. Но, как общее правило, можно считать, что если обжатия будут выбраны так, чтобы возможно равномерно нагружать приводной двигатель во всех пропусках, то с точки зрения снижения удельного расхода энергии результат будет положительный. Последнее же условие можно осуществить только при надлежащей калибровке валков.

В заключение остановимся кратко на методе бесслитковой прокатки, представляющем с точки зрения снижения удельного расхода энергии на этот процесс большой интерес. Метод этот, как известно, заключается в прокатке металла в жидком состоянии, минуя необходимость предварительной отливки его в слитки с последующим нагревом последних до температуры прокатки. Произведенные нами ориентировочные расчеты показали, что для прокатки, например, блюмсов сечением 200×100 mm расход энергии может снизиться приблизительно в 5 раз по сравнению с обычными методами прокатки.

Считаем необходимым упомянуть также о предложенном Институтом прикладной физики ЛГУ методе бесслитковой прокатки металлов (в том числе и чугуна[21]). Этот метод также сулит богатые перспективы в отношении снижения удельного расхода энергии на процесс прокатки. Так, по данным указанного источника на прокатку ленты $100 \times 0{,}4$ mm требуется всего около 0,18 kWh/t вместо примерно 60 kWh/m при обычном методе прокатки.

Выводы. Для возможного снижения удельного расхода энергии на процесс прокатки необходимо:

1. Обеспечивать определенный режим нагрева металла и минимальное остывание его при подаче от нагревательной печи к стану и в процессе прокатки.

2. Прокатка определенного профиля должна вестись на стане с минимально допустимым для данного профиля диаметром валков.

3. Калибровка валков должна производиться так, чтобы, удовлетворяя технологическим требованиям процесса прокатки, одновременно максимально снизить удельный расход энергии.

4. У реверсивных станов типа блюминг и т. п. применять везде, где это возможно, по мощности питающей сети схему Леонарда без маховика Ильгнера. Одновременно необходимо форсировать научно-исследовательскую работу по созданию ртутного выпрямителя с сеточным управлением для замены в этой схеме вращающегося преобразователя.

5. У нереверсивных станов применять маховик только на основе тщательного расчета и по воз-

[20] См. например, ВЭП № 9, 1936.

[21] См журн. „Сталь" № 11 1937.

можности с автоматическим регулятором скольжения.

6. У непрерывных станов применять для питания приводных двигателей постоянного тока ртутные выпрямители с сеточным управлением.

7. Внедрять, где это возможно, одношпиндельные и многовалковые (с опорными валками) станы.

8. Максимально внедрять текстолитовые и аналогичные подшипники, а там, где это может дать преимущество, роликовые подшипники.

9. При составлении графика прокатки максимально снижать продолжительность пауз и ликвидировать «холостые хода» станов.

10. Зажатие подшипников производить только в меру, как это требуется для нормального хода прокатки.

11. В прокатных цехах организовать тщательный учет по отдельным станам расхода энергии на прокатку с выделением основных факторов, влияющих на этот расход.

12. Независимо от этого проводить необходимые экспериментальные работы как в прокатных цехах, так и в научно-исследовательских институтах.

Наличие экспериментально полученных энергетических характеристик отдельных прокатных станов при различных режимах их работы одновременно служит основой для нормирования удельных расходов.

13. Максимально форсировать исследовательскую работу в области бесслитковой прокатки, уделяя должное внимание энергетическому фактору.

К ЗАЩИТЕ ОТ ГРОЗОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Измерение ферромагнитными регистраторами токов молнии в энергосистемах СССР

И. С. Стекольников и А. А. Ламдон

Энергетический институт им. Кржижановского Академии наук СССР

ФЕРРОМАГНИТНЫЙ материал, находящийся в магнитном поле, созданном волной тока, приобретает некоторую остаточную намагниченность B_0. При определенных условиях эксперимента по значению B_0 можно судить о максимальной величине волны тока и ее полярности. Метод регистрации амплитудных значений импульсных токов, называемый в дальнейшем магнитозаписью, получил широкое применение при измерениях токов молнии. В современном виде аппаратура для магнитозаписи состоит в основном из ферромагнитных стержней-регистраторов и прибора для определения в условных единицах остаточной намагниченности—магнитометра. Кроме этого, применяется ряд вспомогательных приборов для обнаружения намагниченных регистраторов и градуировки магнитометра.

Для реализации метода необходимо разрешить ряд существенных вопросов, касающихся как подбора самого ферромагнитного материала, так и разработки измерительной схемы.

При изготовлении регистраторов нужно стремиться свести к минимуму влияние вихревых токов на величину B_0 [зависимость $B_0 = f(I_в)$]. Трудноустранимый эффект может быть [illegible] достигнут подразделением тела регистратора [illegible] на возможно тонкие части, направление которых [illegible] совпадает с силовыми линиями магнитного поля, либо применением материала, содержащего в непроводящей массе зерна магнитного вещества.

Материал, применяемый для изготовления регистраторов, должен обладать достаточной коэрцитивной силой для того, чтобы обеспечить сохранение остаточной намагниченности на долгое время $[B = f(t)]$. Этими же соображениями нужно руководствоваться при выборе размеров регистраторов.

Наконец, регистраторы должны быть осуществлены таким образом, чтобы свести к минимуму влияние на величину остаточной намагниченности числа одинаковых импульсов [зависимость $B_0 = f(n)$]. В лучшем случае, остаточная индукция, создаваемая одним импульсом амплитудой I, может достигнуть значения B_0, обусловленного постоянным током той же величины I. Эта характеристика ферромагнитика зависит от его структуры.

При измерениях и расшифровке показаний регистраторов необходимо считаться с влиянием импульсов различной полярности на результирующую величину B_0, земного магнетизма на магнитометр и с влиянием посторонних токов на регистратор (например тока к. з., текущего через опору, на которой установлены регистраторы).

Практически при массовых измерениях точность метода магнитозаписи колеблется в пределах от ± 5 до $\pm 20\%$.

Для наглядного представления метода магнитозаписи на рис. 1 схематически показаны отдельные его этапы. На рисунке *a* показан момент удара молнии в опору, на которой установлен держатель с двумя регистраторами; *b* дает представление о способе отыскания опоры, по заземляющему спуску которой прошел ток молнии (стрелка компаса притянулась к намагниченному импульсом гвоздю, вбитому у основания опоры); *c* изображает регистратор, уложенный в гнездо

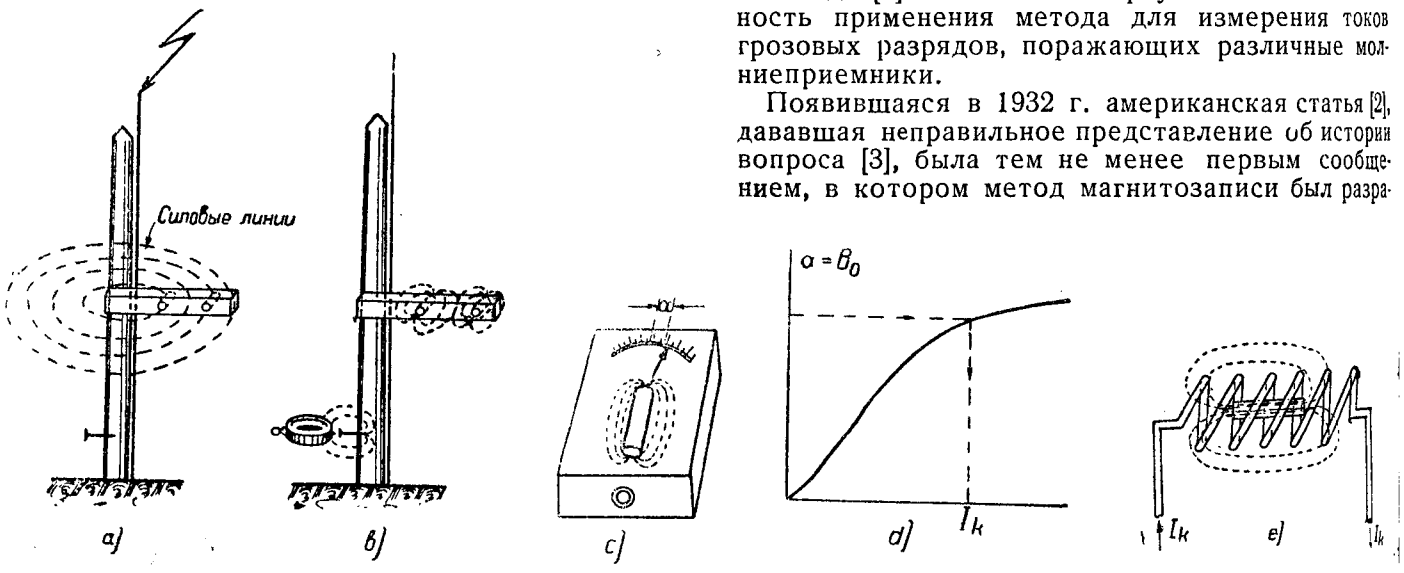


Рис. 1. Пояснение метода магнитозаписи токов молнии

измерительного прибора (магнитометра) и вызывающий отклонение стрелки прибора на угол α.

По найденной величине α на градуировочной кривой *d* определяется ток I_k, который в намагничивающей катушке (*e*) создавал ту же величину B_0, что и ток молнии.

Последний этап метода заключается в применении формулы, позволяющей по току I_k, учитывая конфигурацию опоры и расположение регистратора, найти амплитудное значение тока молнии. При этом, по возможности, учитываются упомянутые выше факторы, влияющие на результаты измерений.

Применение метода магнитозаписи для измерения параметров разрядов: амплитуды, полярности и процента колебательности разряда, помимо большого научного интереса, имеет исключительно важное практическое значение. При помощи этого метода определятся расчетные токи молнии для отдельных районов СССР, что необходимо для проектирования как новых грозоупорных линий передач, так и защиты существующих.

Метод магнитозаписи токов молнии позволяет также вывести для отдельных райнов СССР действительное соотношение между числом гроз и их интенсивностью, так как почти все разряды в элементы линии передачи, а также значения токов будут регистрироваться вне зависимости от того, произошло ли выключение линии передачи или нет.

Естественно, определяемые параметры молнии могут служить исходным материалом для анализа грозовых аварий в высоковольтных системах.

Магнитозапись впервые была проведена Покельсом в 1898 г. Для измерений амплитудных значений токов молнии Покельс [1] использовал свойство нефелиновых базальтов намагничиваться под действием импульсных токов с практически исчезающей малой инерцией.

После работы Покельса прошло, однако, около четверти века, прежде чем его методом заинтересовались электротехники. По сообщению Грюневальда [4] в 1925 г. Теплер указал на желательность применения метода для измерения токов грозовых разрядов, поражающих различные молниеприемники.

Появившаяся в 1932 г. американская статья [2], дававшая неправильное представление об истории вопроса [3], была тем не менее первым сообщением, в котором метод магнитозаписи был разработан в плане широкого применения. В опубликованной в 1934 г. статье [4] Грюневальд сообщал, что он применяет ферромагнитные регистраторы уже с 1926 г. В этой же работе сообщались результаты эксплоатации регистраторов за время с 1926 по 1933 г. Начиная с 1933 г. применение метода магнитозаписи развивается весьма интенсивно.

В СССР работы по широкому внедрению его начались в 1936 г. Измерения токов молнии производились в электросетях ряда районных управлений и комбинатов Главэнерго, расположенных в различных районах СССР. Общее руководство измерениями осуществлялось Энергетическим институтом Академии наук СССР. В 1937 г. в энергообъединения было направлено 47 000 регистраторов, из которых на линиях передачи, стержневых молниеотводах и других объектах было установлено 36 000 шт. (в 1936 г. было установлено 9400 шт.).

Разработка аппаратуры и метода отыскания на линиях намагниченных токами молнии регистраторов. В 1932 г. в лаборатории перенапряжений ВЭИ И. Стекольниковым в связи с работами по измерению параметров атмосферных разрядов были начаты исследования по ферромагнитным регистраторам [3]. Продолженные затем исследования привели к лабораторной разработке аппаратуры и методики определения амплитудных значений импульсных токов [5]

В качестве регистраторов были применены стеклянные трубки, заполненные шлифовальной пылью, состоящей из пылинок стали и карборунда.

Большая работа, проведенная сотрудниками лаборатории перенапряжений ВЭИ и лабораторией по изучению молнии Энергетического института Академии наук совместно с исследовательской лабораторией опытного завода пластмасс им. Фрунзе, позволила в дальнейшем освоить новый тип регистраторов — прессованных — и организовать их массовый выпуск.

До последнего времени данные о физических характеристиках ферромагнитных регистраторов, применяемых за границей — пластинчатых в Америке и проволочных в Германии, — отсутствовали.

В 1937 г. опубликована работа Blum и Finkelnburg [6], в которой на основании анализа характеристик свойств американских и немецких регистраторов авторы приходят к заключению (по их мнению оригинальному) о желательности применения прессованных регистраторов. Такие регистраторы, однако, уже в течение двух лет широко применяются в СССР.

Весьма существенным качеством прессованных регистраторов является также то, что они механически прочны и относительно легко изготовляются в больших количествах. Наряду с перечисленными достоинствами эти регистраторы имеют некоторые недостатки, которые, однако, могут быть полностью устранены выбором в качестве наполнителя соответствующего ферромагнитного материала.

Влияние одинаковых повторных импульсов на остаточную намагниченность должно быть минимальным. Действительно, при подсчетах предполагается, что намагничение регистратора произошло только от одного импульса, между тем, как известно, разряды молнии часто состоят из нескольких повторных импульсов [9].

Опыты показали, что B_0 от действия повторных импульсов увеличивается тем больше, чем больше напряженность магнитного поля H. При намагничении регистратора тремя импульсами тока с характеристикой 2/10 μ sec (при средних H), остаточная намагниченность увеличивается на 2—3% по сравнению с индукцией B_0, вызванной одним импульсом.

Остаточная индукция, вызванная одним импульсом с амплитудой I, составляет 90—95% от B_0, полученной регистратором от действия постоянного тока той же величины I.

Определение коэрцитивной силы H_c регистраторов показало, что у различных групп она колеблется около величины, равной 200 A/cm.

Изучение степени неравномерности намагничения регистраторов по их сечению имеет существенное значение в силу того, что регистраторы изготовлялись из массы, в которую входят компоненты[1] различных удельных весов. Во время процесса прессовки пылинки стали как наиболее тяжелые части несколько оседали. Это дало неравномерное их распределение по сечению регистратора, что, в свою очередь, вызывало неравномерное намагничение его. Опыт показал, что если производить определение B_0 при различных положениях регистратора на измерительном приборе, разница в показаниях достигает 5—10%.

Опыты показали, что при недостаточно хорошей прессовке влага губительно отражается на механических и магнитных свойствах регистраторов. После большого количества попыток был найден удовлетворительный способ предохранения регистраторов от разрушительного действия влаги в виде пропитки парафином и тем самым были сохранены для эксплоатации много тысяч стержней.

Определение влияния на B_0 повышенной температуры показало, что в практических пределах изменения температуры этот эффект можно не учитывать.

Для возможности установки на опорах наиболее однородных по характеристикам регистраторов было решено рассортировать всю массу регистраторов на группы в зависимости от магнитных свойств каждого. Принадлежность регистратора к той или иной группе определялась по значениям остаточной намагниченности после намагничения его в поле импульсного тока последовательно при двух значениях напряженности: $H_1 = 120$ и $H_2 = 430$ A/cm. Разбивка регистраторов на группы производилась по специально составленной таблице[2]. Всего было образовано 84 группы, в каждой из которых разброс не превышал $\pm 10\%$ от средней характеристики данной группы. С помощью составленной таблицы было расклассифицировано около 50 000 регистраторов.

Применявшаяся при изготовлении регистраторов в 1936 и 1937 гг. масса представляет собой отходы тонкой шлифовки колец шарикоподшипников. В 1937 г. производились поиски более совершенных материалов. Лучшие из них — это окись железа с кобальтом (изготовленная центральной лабораторией Электрокомбината) и порошок тонкостью в 100—200 меш, полученный после раздробления и разлома в шаровых мельницах высококоэрцитивного сплава алюминия с никелем (сплав получен из лаборатории магнитных материалов ВЭИ).

Чувствительность (под ней подразумевается скорость изменения B_0 в зависимости от H) и абсолютная величина B_0 значительно выше у окиси железа с кобальтом и у порошка сплава алюминия с никелем при средних и больших значениях H, но при малых значениях H они, к сожалению, ниже значений B_0 применяемой шлифовальной пыли. Между тем достаточно большие B_0 при малых значениях H весьма существенны при записях токов молнии в случаях растекания тока по многим параллельным путям, что имеет место в некоторых типах металлических опор, противовесах и т. п.

Конструкция магнитометра. Для определения величины B_0 регистратора применялся прибор, выполненный по типу приборов, которыми пользовались американцы [2], разработанный лабораторией перенапряжения ВЭИ [5] и названный магнитометром.

Принцип действия прибора заключается в том, что отклонение стрелки происходит от взаимо-

---

[1] Рецепт прессованных регист[illegible] стали с карборундом, 38,9% бак[illegible] [illegible] есной муки, 2% уротропина [illegible]

[2] В составлении ее принимал участие А. П. Беляков.

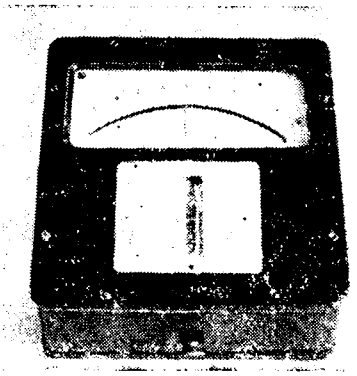


Рис. 2. Общий вид магнитометра

действия полей подвижного постоянного магнита, укрепленного на оси прибора, и неподвижного регистратора. Магнитометр обладает достаточной чувствительностью и прочностью. Общий вид прибора показан на рис. 2.

Разработка метода отыскания намагниченных токами молнии регистраторов. Основная трудность эксплоатации регистраторов в 1937 г. заключалась в отыскании намагниченных токами молнии регистраторов. Было изготовлено несколько образцов индикаторов: улучшенный образец существующего типа (более чувствительный), астатический индикатор и, наконец, индикатор со световым сигналом, в котором цепь тока замыкалась магнитной стрелкой прибора. Однако ни один из них не был вполне удовлетворительным.

Новый метод, значительно упрощающий эксплоатацию их, был предложен И. Стекольниковым. Сущность его заключается в использовании остаточной намагниченности обычных железных гвоздей, забиваемых у основания деревянных опор, или кусков железной проволоки, обматываемых вокруг уголков металлических мачт, после того как они были намагничены током молнии, протекшим вблизи гвоздей или внутри витка проволоки. Этот метод исключает необходимость влезать на опоры при поисках намагниченных регистраторов.

Проверка намагниченности гвоздей производится поднесением к шляпке гвоздя обычного компаса в двух или трех положениях. Если гвоздь намагничен, то один из концов стрелки компаса в зависимости от полярности разряда во всех положениях будет притянут к шляпке гвоздя. На металлических опорах проверка намагниченности проволоки производится поочередным поднесением компаса к обоим выступающим концам ее.

Установка и эксплоатация регистраторов. Превалирующее количество опор и стержневых молниеотводов было снабжено держателями с тремя регистраторами в каждом. Это позволило повысить точность измерений и измерить токи в более широком диапазоне.

В 1937 г. из общего числа 47 300 шт. регистраторов было установлено [3] 36 160 шт., что составляет 76,5%. При вычете из числа неустановленных регистраторов 15% резерва, необходимого на случай замены намагниченных регистраторов, оказывается, что не было установлено [4] 8,5% от общего количества регистраторов против 15,3% в 1936 г.

В 1937 г. магнитозапись проводилась в 11 организациях (против 9 в 1936 г.), которым было предоставлено 47 300 шт. регистраторов вместо 13 450 в 1936 г. Значительная часть намагниченных регистраторов была найдена по намагниченным гвоздям.

Методика подсчета и определения поправочных коэфициентов. Апериодические импульсы. В общем случае ось регистратора составляет некоторый угол φ с касательной к окружности радиуса r, проведенной из центра обтекаемого током I проводника и через регистратор. Тогда, как известно, напряженность поля [5]

$$H = \frac{I}{2\pi r}\ \text{A/cm} \quad \text{или} \quad I = \frac{2\pi r H}{\cos\varphi}\ \text{A}.$$

Для учета неравномерного распределения поля около проводников (особенно около металлических уголков) и конечных размеров регистраторов необходимо вводить в формулу поправочные коэфициенты для каждого из регистраторов, расположенных на различных расстояниях от пути тока молнии. Для определения этих коэфициентов была собрана схема импульсного контура, от которого был получен апериодический ток в 9,8 kA (характеристика волны 4/11 μsec).

Для опор Свирской линии передачи типа П-1, имеющих сложную конструкцию, был поставлен опыт по определению растекания тока по ноге опоры около места крепления держателей. Через специально построенную в масштабе 1:3 модель ноги опоры пропускался переменный 50-периодный ток, равный 250 А. Измерения тока в основном уголке стояка опоры, в подкосах и переплетах (которые производились при помощи клещей Дитце) показали, что по основному уголку в месте крепления держателя протекает 35% тока. В действительности растекание тока молнии по ноге опоры может несколько отличаться от полученного значения, но этим обстоятельством пренебрегли.

Расшифровка колебательных импульсов. При измерении токов молнии необходимо учитывать возможность действия на регистраторы повторных импульсов.

Для рассмотрения влияния на ферромагнитный регистратор различных колебаний импульсов достаточно рассмотреть следующие принципиальные случаи действия двух импульсов.

Оба импульса апериодические и имеют одинаковую полярность. В этом случае величина остаточной намагниченности определяется наибольшим импульсом.

Второй импульс с амплитудой I_2 обратен по

[3] Без Мосэнерго, так как от него сведения и материалы не поступали.

[4] Процент неустановленных регистраторов будет еще меньше, если учесть, что часть регистраторов, очевидно, Мосэнерго была установлена.

[5] В этой формуле значение H находится по величине остаточной намагниченности регистратора из построенной характеристики регистратора $\alpha = B_0 = f(H)$. При определении H потеря намагниченности регистратора от времени преднамеренно не учитывалась. Как известно, около 50% от всего количества разрядов состоит из двух импульсов [9]. Увеличение намагниченности от этого количества импульсов равно приблизительно 2%. Примерно тот же процент намагниченности теряется регистратором за больше промежуток времени, протекающий между ударом молнии и лабораторным обследованием регистратора, что приводит к некоторой естественной компенсации ошибок.

знаку первому (I_1). Здесь возможны случаи, когда $I_2 \geqslant I_1$ и $I_2 < I_1$.

Эффект токов легко проследить по гистерезисной петле рис. 3. На этом рисунке часть кривой, вычерченная сплошной линией, дает изменение намагниченности под действием первого импульса с амплитудой тока I_1 и второго импульса обратного знака с амплитудой $I_2 \geqslant I_1$.

В этом случае остаточная намагниченность B'_0 обратна по знаку B_0.

Когда $I_2 < I_1$, остаточная намагниченность, как видно из рис. 4, может быть обратна по знаку величине B_0 или совпадать с нею в зависимости от абсолютного значения I_2.

Отмеченными характерными особенностями ферромагнитных тел можно воспользоваться для разработки метода расшифровки показаний регистраторов при периодических импульсах. На рис. 5 показаны соотношения величин остаточной намагниченности двух регистраторов, расположенных от токоведущего провода на расстояниях A и B и находящихся в отношении $\frac{A}{B} = \frac{1}{3}$. Намагничение производилось двумя последовательно действовавшими апериодическими импульсами тока разной полярности с амплитудами I_1 и I_2, причем $\frac{I_2}{I_1} = \frac{2}{1}$. Легко понять, что в данном случае $\frac{H}{h} = 3$, $\frac{H}{H'} = \frac{h}{h'} = 2$.

От первого импульса ближний к проводу регистратор приобретает остаточную намагниченность B_0, а дальний — b_0. Второй, отрицательный импульс вызывает *перемагничение* ближнего регистратора (B'_0) и ослабление остаточной намагниченности дальнего (b'_0) *без изменения знака.*

При изменении расстояний A и B или отношения $\frac{I_1}{I_2}$ может изменяться величина и знак отношения $\frac{B'_0}{b'_0}$.

Судить о том, что намагничение регистраторов произошло от импульсов тока различной полярности или, что то же самое, от периодического импульса, можно по неравенству отношений $\frac{B = f(B'_0)}{b = f(b'_0)} \neq \frac{A}{B}$. Метод количественной расшифровки показаний регистраторов для таких случаев был разработан в виде номограмм американцами [8].

Всего для расшифровки 24 измеренных в опорах колебательных токов было построено по переработанному нами методу [6] американцев 17 номограмм.

Результаты магнитозаписи за 1937 г. и их анализ.

За грозовой сезон 1937 г. были измерены токи молнии на 95 опорах линий передач и молниеотводах в различных энергообъединениях [7]. Сводка данных о характере линий передач, измеренных в них токах молнии и некоторые пояснения к полученным результатам приведены в таблице.

На рис. 6 приведен график значений токов молний в опорах, измеренных в СССР в 1937 г. На том же графике для сравнения нанесены результаты многолетних аналогичных измерений (тем же методом магнитозаписи), проведенных в Америке и Германии. Как видно из рисунка, характер зависимости амплитудных значений токов от их процентного состава в общем числе измерений по данным СССР, Америки и Германии поразительно совпадает. В особенности это касается графиков СССР и Америки.

Следует особо отметить, что в СССР непосредственно в опорах измерены токи с амплитудами 150—230 kA. Наибольшие значения амплитуд токов в опорах, измеренных в единичных случаях

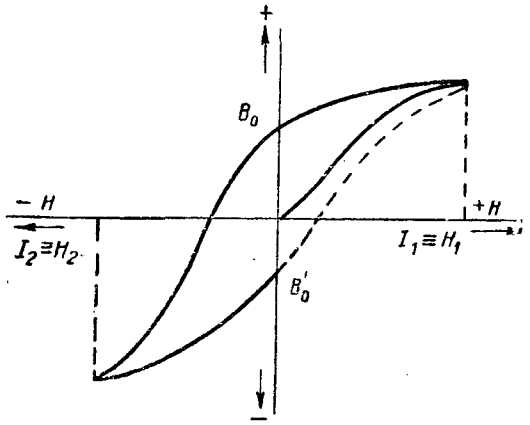


Рис. 3. Изменение B_0 при действии на регистратор двух импульсов разных знаков ($I_1 \geqslant I_2$)

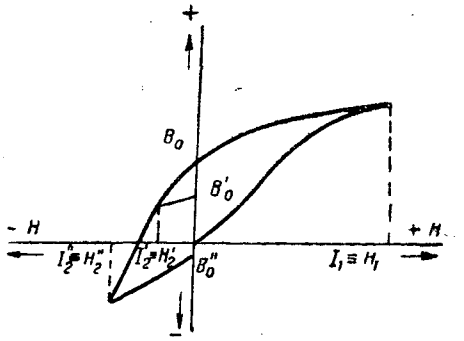


Рис. 4. Изменение B_0 при действии на регистратор двух импульсов разных знаков ($I_1 < I_2$)

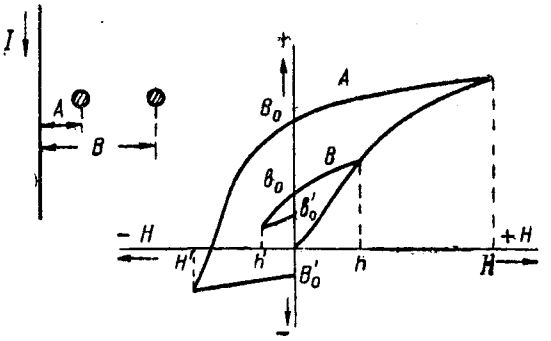


Рис. 5. Изменение B_0 регистраторов, находящихся на расстояниях A и B от пути тока при действии двух импульсов разных знаков

Подробно метод изложен в отчете ЭНИН о магнитозаписи токов молнии в 1937 г.

Наиболее полноценный материал был получен от Днепростроя, управления Свирской линии передачи, электросети Ленэнерго и ТНИГЭИ. Руководители работ по магнитозаписи в этих энергообъединениях активно содействовали успешному проведению исследований.

Сводка результатов измерения токов

Организация	Линия передачи	№ опор	Сопротивление заземления	Ток в опоре кА	Полярность разряда	Характер тока	% колебательности	Примечание
Азчерэнерго	Артем — Ростов 1, 110 kV	371	13,0	21	—	Апер.	—	Опора деревянная, не защищенная тросами, на опоре стояли деионные разрядники
	Л. Ф.—А. Левый, 35 kV	12	4,9	36	—	Апер.	—	Все опоры линии Л. Ф.—А. Левый и Канцеровка—Марганец деревянные, не защищенные тросами. На опорах надстроены молниеотводы высотой 6,5 m от траверсы опоры
		13	3,7	45	—	»	—	
		18	5,5	38	—	»	—	
Днепрознерго	Канцеровка — Марганец, 35 kV	75	5,0	21	—	Апер.	—	Все приводимые случаи разрядов перекрытия изоляции не вызвали
		36	4,5	40	—	»	—	
		120	4,5	34	—	»	—	
		78	5,3	40	+	»	—	Для опор 115, 180, 26 токи подсчитаны по регистраторам, лежавшим в средних гнездах держателей, но для расстояния $r_1 = 7$ cm
		201	7,5	13	—	Апер.	—	
		202	5,2	13	—	»	—	
		115	5,0	38	+	»	—	
		10	5,0	25	—	Апер.	—	
		180	7,5	35	+	»	—	
		121	5,0	10	+	Апер.	—	
		122	4,9	77	+	Колеб.	16	
		123	5,2	32	+	Апер.	—	
		124	5,2	7	+	»	—	
		101	7,0	15	—	»	—	
		26	9,2	39	+	»	—	
Управление Свирской линии передачи	Свирская линия передач, 220 kV	540	70	17	—	Апер.	—	Линия на всей длине защитных тросов не имеет, опоры линии металлические, одноцепные
		539	38,0	< 8	?	»	—	
		166	20,0	114	+	Колеб.	30	
		165	14,5	139	+	»	20	На опоре 539 сработал счетчик разрядов, была перекрыта гирлянда изоляторов. Регистраторы не намагнитились
		709	2,7	20	—	Апер.	—	
		705	5,1	168	—	Колеб.	17	
		681	13,0	109	—	Апер.	—	
		625	9,0	32	—	»	—	
		742	5,4	< 8	—	»	—	
		741	5,5	59	—	Апер.	—	
		792	5,2	25	—	»	—	
		791	3,7	62	—	Апер.	—	
		699	2,3	152	+	»	—	
		551	4,3	38	—	»	—	
		550	3,8	229	—	Колеб.	20	
		416	9	33	—	Апер.	—	
		427	3,9	139	—	Колеб.	16	
		770	2,1	38	—	Апер.	—	
		774	3,2	43	—	»	—	
Казэнерго-комбинат	Заречье—Зел. Дол, 35 kV	165	—	8	—	Апер.	—	На рассматриваемом участке защитных тросов нет, опоры линии деревянные
		167	—	8	—	»	—	
		169	—	4	—	»	—	
Уралэнерго-ЮУРЭС	ЧГРЭС—Златоуст, 110 kV	277	35	32	+	Апер.	—	На рассматриваемом участке защитных тросов нет, опоры линии деревянные. Перекрытие изоляции на всех опорах произошло с проводов на заземляющие спуски, проложенные на нижней траверсе, где должны были стоять деионные разрядники
		310	20	9	—	»	—	
		307	30	70	—	Колеб.	3	
	Кыштым—Уфалей, 110 kV	252	> 100	5	—	Апер.	—	На рассматриваемом участке защитных тросов нет, опоры линии деревянные. На опоре стояли деионные разрядники
	Молниеотвод № 101	—	40	119	+	Колеб.	7	Молниеотвод установлен на расстоянии 10 m от проводов линии

(продолжение таблицы)

Организация	Линия передачи	№ опор	Сопротивление заземления	Ток в опоре кА	Полярность разряда	Характер тока	% колебательности	Примечание
Горэс	Дзержинск — Кулебаки, 110 kV	486	*	12	—	* *	—	На рассматриваемом участке защитных тросов нет, опоры линии деревянные. На опорах 486, 489 и 492 стояли деионные разрядники
		489	*	52	—	Апер.	—	
		492	*	18	—	»	—	
	Балахна—Моховые горы, 110 kV	108	—	6	+	* *	—	На рассматриваемых участках защитных тросов нет, опоры линии деревянные. На опорах 47 и 71 стояли деионные разрядники
		109	—	5	+	Апер.	—	
		111	—	6	+	»	—	
		47	*	25	+	»	—	
		71	*	5	—	* *	—	
Донэнерго	Зугрэс—Мариуполь, 115 kV	442	—	17	—	Апер.	—	На рассматриваемых участках защитных тросов нет, опоры линии деревянные
		441	—	41	—	Колеб.	23	
		440	—	62	—	»	20	
		419	—	50	—	»	29	
		42°—II	—	18	—	»	17	
		42°—IV	—	27	—	»	28	
		421	—	5	+	* *	—	
		370	—	6	—	Колеб.	—	
		387	—	8	—	Апер.	—	
	Сталинская № 5—Еленовка, 35 kV	195	—	20	+	* *	—	На рассматриваемых участках защитных тросов нет, опоры линии деревянные
		202	—	22	—	* *	—	
		209	—	22	+	Колеб.	27	
		211	—	16	+	Апер.	—	
Ленэнерго	В—III, 110 kV	522	—	18	—	Апер.	—	На рассматриваемых участках защитных тросов нет, опоры линии деревянные. На опорах 803 и 804 были отдельные разряды по ногам. На опорах 805, 493 общие разряды. На опорах 14 538 и 71 стояли деионные разрядники
		525	—	11	—	Колеб.	24	
		538	*	16	—	* *	—	
		329	8,5	26	+	Колеб.	42	
		802	—	3	—	* *	—	
		803—I	—	7	—	Апер.	—	
		803—II	—	13	—	Колеб.	10	
		804—I	—	11	—	Апер.	—	
		804—II	—	17	—	Колеб.	6	
		805—I	—	8	—	* *	—	
		805—II	—					
		670	—	3	+	Колеб.	—	
		505	—	3	—	»	—	
		501	—	2,5	—	»	—	
		493—I	—	5	+	»	—	
		493—II	—					
		347	—	12	+	»	—	
		297	—	6	+	»	25	
		268	—	8	—	Апер.	—	
		14	*	18	—	* *	—	
ТНИГЭИ	Дзорагэс—Аллаверды, 22 kV	67	—	19	—	Колеб.	5	На рассматриваемых участках защитных тросов нет, опоры линии деревянные. Для опоры с неизвестным номером ток подсчитан для $r_1 = 7$ см
		73	—	15	—	* *	—	
		74	—	20	—	Колеб.	18	
		76	—	41	+	»	23	
		139	—	5	+	Апер.	—	
		143-I	—	30	—	Колеб.	24	
		143—II	—					
		111	—	6	—	* *	—	
	Зестафони—Чиатури, 38 kV	61	—	5	+	* *	—	
		?	—	4	+	* *	—	
Ивэнерго-комбинат	Молниеотвод подстанции Середа	—	—	14	—	Колеб.	5	

Примечания: 1. Звездочка означает, что сопротивление заземления заземлителя не измерялось или не сообщено энергообъединением.

2. Две звездочки указывают, что характер разряда неизвестен.

3. При малых значениях токов молнии токи к. з. вносят ошибку, однако несущественную, ибо порядок измеряемых токов от этого не меняется.

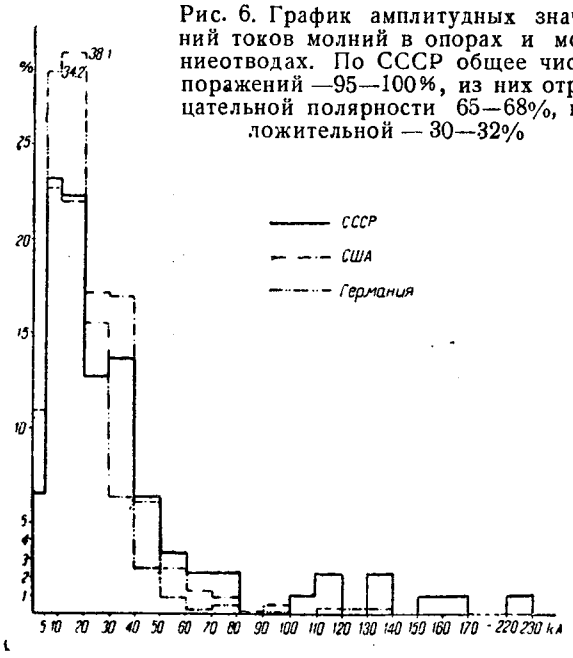


Рис. 6. График амплитудных значений токов молний в опорах и молниеотводах. По СССР общее число поражений —95—100%, из них отрицательной полярности 65—68%, положительной — 30—32%

за границей, достигают 100 kA в Германии и 110—140 kA в Америке. Фигурирующие в иностранных данных токи в 200—220 kA получены не прямым измерением, а просуммированы по значениям, определенным в ряде опор, объединенных тросом.

В практике заграничных исследований, производящихся в основном на линиях с металлическими опорами, связанными тросами, принят метод суммирования токов отдельных мачт для получения полного тока канала молнии. Этот метод на основании существующих воззрений не дает уверенности в правильности полученных результатов [3].

Помимо этого, с принципиальной стороны самого рассматриваемого явления нецелесообразно характеризовать токи молнии суммарными величинами. Есть основания считать, что ток в канале молнии определяется местными условиями (сопротивлением заземлителя, материалом и конструкцией пораженного сооружения). Некоторые примеры этого приводятся ниже. Учитывая высказанное положение, нельзя считать целесообразным приводить в качестве ориентирующих характеристик суммарные токи канала молний. Анализ результатов случаев поражения молнией отдельных опор дает возможность установить, что 95 опор были поражены 84 грозовыми разрядами; из этого числа разрядов 56 (67%) имели отрицательную полярность, а 28 — положительную. Для сравнения этих цифр с аналогичными данными по Германии и Америке приведем результаты, взятые из ряда литературных источников [12—15].

В Германии из 654 ударов 86% имели отрицательную полярность, в Америке из 454 разрядов отрицательную полярность имели 95%.

В связи с этим интересно отметить, что в СССР при регистрации напряжений, индуцированных на антеннах разрядами в землю, обнаружено [9], что количество отрицательных молний составляло 93% (при общем числе разрядов 75).

Интересно также отметить, что 38 разрядов имели апериодическую форму, 22 были колебательными и 24 — неопределенной формы. Величина амплитуды второй полуволны тока в одном случае превышает 30% от первой полуволны.

С целью определения влияния местных условий на разряды молнии на основании полученных материалов построены зависимости токов для двух различных групп опор и молниеотводов (рис. 7): 1) для металлических опор, не несущих тросов, для деревянных опор с молниеотводами на них и для отдельно стоящих молниеотводов; 2) для деревянных опор, не несущих тросов и не имеющих заземляющих спусков.

Характеры графиков резко отличаются друг от друга. В большинстве случаев величины токов, измеренных на деревянных опорах, не выходят за пределы 5—10 kA; наблюденное максимальное значение тока — 60 kA. Для металлических опор основное число измерений падает на токи 30—40 kA, наибольшее значение измеренного тока—230 kA.

На рис. 8 сопоставлены графики процентного распределения токов молнии в двух энергообъединениях. Линия передачи одной системы находится в северной полосе, а другой — в средней полосе СССР. Как видно из рисунка, токи молнии в районе Свирской линии резко превышают токи, измеренные на линиях Днепровской системы, хотя удельное число поражений Свирской системы (число поражений на 1 km) меньше, чем у сопоставляемой Днепровской. Сравнение величин токов, измеренных в условиях примерно одинаковых сопротивлений растекания опор, позволяет сделать вывод, что географическое расположение рассматриваемых систем не имеет того значения, которое ему приписывают при обычном рас-

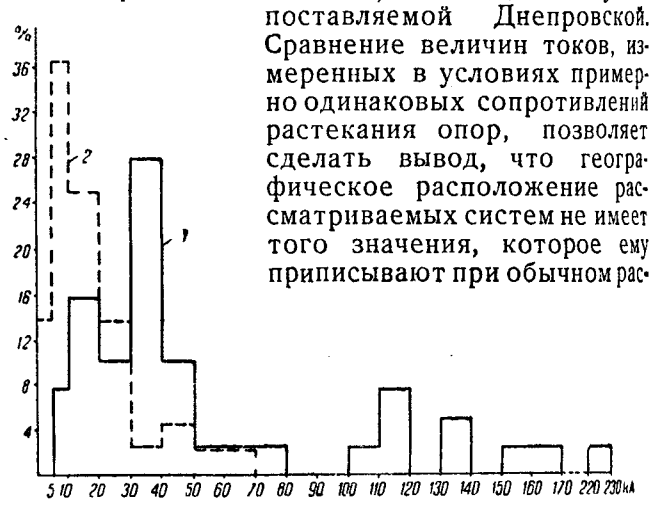


Рис. 7. Графики амплитудных значений токов молнии. *1* — для металлических опор, не снабженных защитными тросами, молниеотводов и деревянных опор с молниеотводами. Всего поражений 39—100%; из них отрицательных 27—69%, положительных — 12—31%; *2* — для деревянных опор, не имеющих заземляющих спусков и не снабженных защитными тросами. Всего поражений 44—100%; из них отрицательных 28—64%, положительных — 16—36%

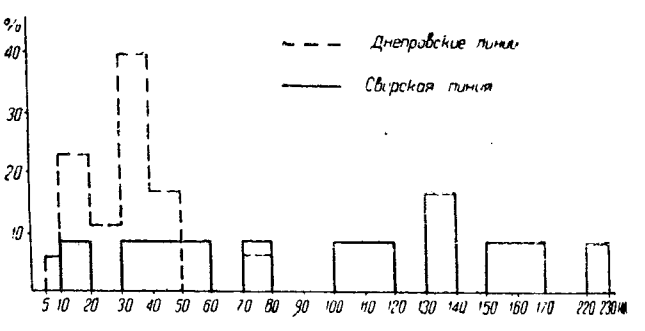


Рис. 8. Сопоставление токов, измеренных на Свирской и Днепровских линиях передач

смотрении этого вопроса. С другой стороны, некоторые данные, полученные при наблюдениях за эксплоатацией высокогорных систем на Кавказе, проходящих в весьма грозоносных районах, показывают, что токи разрядов, поражающих линии (даже на металлических опорах), имеют относительно небольшие величины.

Таким образом проведенные исследования в этой их стадии показывают, что между цифрами, характеризующими грозоносность (по числу дней), и токами молнии не существует прямой связи. Этот вывод имеет в принципиальном смысле кардинальное значение для составления нормативных указаний в отношении проектирования грозоупорных систем. Его практическая интерпретация, естественно, требует бо́льшего количества измерений, проводимых в самых разнообразных районах СССР.

Ниже приводится фактический материал и сделанные заключения.

а) Анализ магнитозаписей на деревянных опорах в ряде энергообъединений показывает, что расщепления деревянных опор, иногда весьма большие, происходят при токах, зачастую не превышающих 5—7 kA. Таким образом по характеру расщепления опор не следует судить о величине поразившего их тока.

б) Интересный случай имел место в Днепроэнерго. На двух рядом стоящих опорах 35-kV линии было зарегистрировано два отрицательных разряда. Ток более интенсивного разряда — 50 kA. Установленные через одну опору клидонографы записали лихтенберговские фигуры на двух крайних фазах. На клидонограммах измерены значительной величины напряжения, которые, повидимому, были вызваны электромагнитной индукцией тока, протекавшего через заземляющий спуск опоры. Данные для точного анализа, к сожалению, недостаточны, однако, базируясь на полученных из энергообъединения материалах, аналитическим расчетом приближенно определена константа $\left(T=\frac{1}{\omega}\right)$ фронта тока. Она оказалась равной 3 μ sec, что соответствует крутизне $\left|\frac{di}{dt}\right|_{max}=15$ kA/μ sec.

в) При поражении одной из опор Свирской линии передачи с сопротивлением заземления $R=20$ Ω была перекрыта изоляция опоры. Измеренный ток оказался равен 114 kA (произведение $IR=2280$ kV).

Этот пример показывает, что величины токов молнии, поражающих опоры в „слабогрозовых районах“ (по классификации временных руководящих указаний), достигают значений, при которых рекомендованные величины сопротивлений ($R=20$ Ω), даже на линиях, снабженных защитными тросами, оказываются неприемлемыми. Действительно, полагая, что при ударе в опору линии, имеющей трос (при идентичных условиях заземления мачт), в нее идет 60% тока молнии [4], находим интересующую нас величину тока в опоре. При общем токе молнии 130 kA она оказывается равной 78 kA. Произведение $IR=78\cdot 20=1560$ kV, и, следовательно, можно ожидать обратного перекрытия. Таким образом говорить о полной грозоупорности такой линии невозможно.

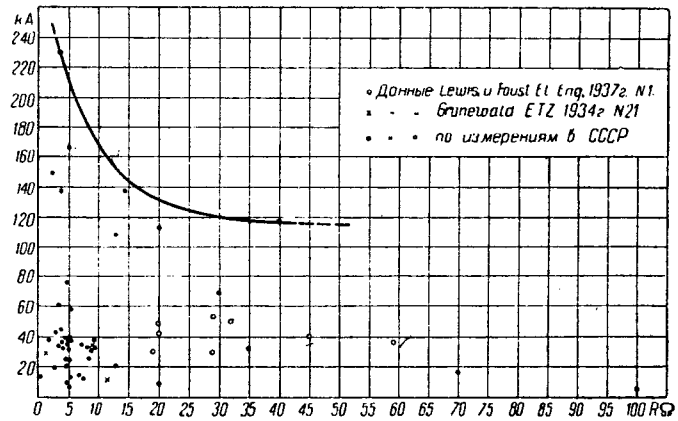


Рис. 9. Зависимость амплитудных значений токов молнии от сопротивления заземлителей пораженных опор и молниеотводов

Этот случай дает повод еще раз подчеркнуть необоснованность степени грозозащитных мероприятий от числа грозовых дней по существующим грозовым картам.

г) Исходя из уже высказанных нами предположений, базирующихся на представлениях, развитых в работах по избирательной поражаемости [10—11], о связи между величиной тока молнии и местными условиями поражаемого объекта, на рис. 9 построена зависимость максимальных токов, измеренных в отдельных опорах, от сопротивления заземлителя. Полученная область значений $I=f(R)$ ограничивается кривой, имеющей ожидаемый нами аллюр. На этом же графике нанесены точки, собранные путем тщательного анализа существующей литературы по магнитозаписи. Как видно, все точки лежат глубоко в области ограниченной названной кривой.

Конечно, пока преждевременно говорить с уверенностью об общности зависимости (для этого число измерений должно быть увеличено), однако полученный характер кривой весьма интересен.

д) Следует отметить любопытный факт, неоднократно наблюдавшийся на Свирской линии.

За одну грозу происходило поражение опоры линии большим током, обычно не вызывавшим перекрытия изоляции, и поражение значительно меньшим током одного из проводов линии, иногда среднего, с последующим перекрытием изоляции на соседней опоре. Анализ имеющихся материалов показывает, что в этих случаях, возможно, имели место два самостоятельных разряда или два разветвления, поразивших элементы линии.

* * *

Измерения токов молнии, проведенные в 1937 г., дали интересные результаты в ряде направлений. Стало очевидным, что ценность измерений не определяется лишь добавлением числа статистических данных к известным результатам измерений, проведенных за границей; значительно более важным оказывается получение возможности анализа ряда вопросов, не рассматривавшихся до сих пор в литературе, имеющих большую практическую и научную ценность.

Конкретное содержание результатов магнито-

записи токов молнии в 1937 г. сводится к следующему.

Определено процентное распределение токов молнии, поражающих элементы высоковольтных сетей в зависимости от их величины.

Определено процентное соотношение количества отрицательных и положительных разрядов, поражающих элементы электросетей.

Измерены токи молнии в отдельных опорах с максимальными значениями токов до 230 kA, что в 1,65 раза больше полученных за границей токов при аналогичных измерениях.

Обнаружено, что при выборе защитных мероприятий от грозовых разрядов при проектировании линий электропередач или при защите существующих нельзя исходить из числа грозовых дней, определяемого по грозовым картам[8]. Существующее представление о том, что по количеству грозовых дней можно характеризовать районы как „слабогрозовые" и „сильногрозовые", неправильно.

Результаты измерений 1937 г. позволяют установить некоторую зависимость между наибольшими значениями токов молнии и сопротивлением заземления пораженных молнией опор. Последующие измерения уточнят эту зависимость, имеющую весьма актуальное значение.

Дальнейшее развитие магнитозаписи токов молнии, дополненной измерениями максимальной крутизны фронта волны тока, приведет к накоплению необходимых материалов и даст возможность поставить расчет грозоупорных линий передач на более твердое основание.

[8] Уместно упомянуть, что детальное ознакомление с методами составления грозовых карт в районе Кавказа, произведенное И. Стекольниковым и В. Понамаренко, показало их полную несостоятельность и ошибочность.

Литература

1. F. Pockels, Meteorol. Zeitschr., т. 15, 1898, стр. 141 и Wiedem. Annal., т 15, 1898, стр 458.
2. C. Foust and H. Kuehni, GER, т. 35, 1932, стр. 644.
3. И. Стекольников, Всесоюзное бюро по высоковольтным электропередачам. Сборник докладов конференции 1933 г., стр. 81.
4. H. Grünewald, ETZ, т. 35, № 21 и 22, 1934.
5. И. Стекольников и К. Поливанов, Отчет ВЭИ по работе, № 101—016.
6. E. Blum und W. Finkelnburg, Zeitschr. f. Techn. Phys., т. 18, 1937, стр. 61.
7. H. Zaduk, Ar. f. Tech. Mess., 1935, стр 327.
8. C. Foust and I. Henderson, El. Engng. № 4, 1935, стр. 373.
9. И. Стекольников и Х. Валеев, „Электричество" № 1, 1938.
10. И. Стекольников, «Электричество» № 9, 1936.
11. I. Stekolnikof, A. Beljakof, CIGER, доклад 1937 г., стр 327.
12. H. Zaduk, ETZ № 17, 1935, стр 475.
13. W. Lewis and C. Foust, El. Engng, № 1, 1937, стр. 101.
14. H. Grünewald, CIGER, доклад 1937 г., № 316.
15. W. Lewis, CIGER, доклад 1937 г., № 315.
16. И. Стекольников, „Электричество" № 2, 1937.

К ПЕРЕСМОТРУ НОРМ И СТАНДАРТОВ В ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ

О конструкциях трехжильных кабелей с поясной изоляцией на напряжение 6–10 kV

С. С. Городецкий и Н. Н. Войденов
ВЭИ

В НАСТОЯЩЕЕ время по действующему у нас ОСТ 6260 трехжильные кабели с поясной изоляцией на напряжение 6 и 10 kV выполняются с одинаковыми толщинами изоляции между жилами и с жил на оболочку (толщина жильной изоляции равна поясной). Равенство толщин изоляции было взято для того, чтобы в случае заземления одной фазы в системе с незаземленной нейтралью получить одинаковую прочность (считая по среднему градиенту) между жилами и жилами на оболочку.

Однако это довольно грубое решение.

1. Диэлектрическая прочность при данном материале определяется не только расстоянием между электродами, но и формой поля.

2. Поле трехжильного кабеля имеет наибольшую тангенциальную составляющую в пространстве между жилами и наименьшую в изоляции между жилами и свинцовой оболочкой, в частности, в поясной изоляции.

3. Для пробоя и старения кабельной изоляции решающими являются не одни лишь градиенты, а градиенты и время действия их. Следует отметить, что продолжительность работы кабеля при нормальном режиме (трехфазное симметричное напряжение) примерно $260 \cdot 10^3$ h (30 лет). По некоторым расчетам длительность работы с заземлением одной фазы за это время не превысит 300 h.

4. Принятая конструкция с равными толщинами жильной и поясной изоляции нерациональна, так как жильная изоляция при неблагоприятной форме поля длительно работает при градиентах примерно в 1,7 раза больших, чем поясная изоляция, находящаяся в более равномерном поле.

Отказ ряда стран от равенства толщин жильной и поясной изоляции (табл. 1) подтверждает вышесказанные соображения о необходимости пересмотра этого соотношения.

Как видно, США снижают поясную изоляцию примерно на 30%, а жильную оставляют без изменений, в Германии толщину поясной изоляции доводят до скрепляющего пояса (0,5 mm), но зато одновременно увеличивают толщину жильной изоляции. В порядке подготовки материалов для работы по пересмотру ОСТ 6260 на силовые кабели с бумажной изоляцией в кабельной лаборатории ВЭИ производились работы по определению электрических характеристик трехжильных кабелей при нескольких соотношениях толщин жильной и поясной изоляции. В настоящей статье даются некоторые результаты и выводы по выполненной части работы *.

Таблица 1

	СССР (ОСТ 6260)	Англия (нормы 1933 г.)	Германия		США	
			до 1/I 1934 г.	после 1/I 1934 г. [3]	1930 г.	по данным Mildher [4] 1935 г.
Толщина δ_1 жильной изоляции в mm	2,0	1,9	2,0	2,6	2,8	2,8*
Толщина δ_2 поясной изоляции в mm	2,0	1,9	2,0	0,5	2,4	1,7
δ_2/δ_1	1,0	1,0	1,0	0,192	0,85	0,61

* Для кабелей на напряжение 7,5 kV. Остальные данные для 6-kV-кабелей, для систем с изолированной нейтралью.

Эксперимент. Испытания проводились над образцами от 9 барабанов 6 и 10-kV кабелей, изготовленных на трех кабельных заводах.

Образцы имели следующие толщины изоляции и сечения жил (табл. 2).

При сопоставлении электрических характеристик кабелей с различными толщинами изоляции выявилось, что наибольшее различие конструкции кабеля обнаружили в пробивных напряжениях в функции времени. Другие электрические и механические характеристики при изменении конструкции мало отличались друг от друга и в настоящей статье не рассматриваются.

Исследование механизма пробоя и определение пробивных напряжений производилось как при

* В экспериментальной части работы принимал участие инж. В. А. Привезенцев.

Таблица 2

Образцы от барабана	1	2	3	4	5	6	7	8	9
δ_1 в mm	2,75	3,0	3,0	2,0	2,6	2,3	2,1	2,19	1,9
δ_2	2,75	0,5	—	2,0	0,5	0,5	2,1	1,66	1,88
Сечение жил в mm²	3×50	3×50	3×50	3×50	3×50	3×50	3×70	3×70	3×70

симметричном трехфазном напряжении с заземленной нулевой точкой (рис. 1, *а*), так и при трехфазном напряжении с изолированной нулевой точкой, но с заземлением одной из фаз (рис. 1, *а*).

При испытаниях трехфазным симметричным напряжением при всех толщинах поясной изоляции пробой происходил всегда между жилами.

Образцы с равными толщинами поясной и жильной изоляции при испытаниях трехфазным напряжением с заземлением одной фазы также пробивались почти всегда между жилами. По мере же уменьшения толщины поясной изоляции часть пробоев происходила с жил на оболочку. При уменьшении толщины поясной изоляции до 75% от жильной 50% пробоев наблюдалось между жилами и 50% с жил на оболочку (рис. 2).

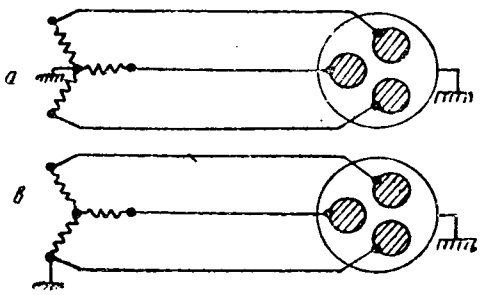


Рис. 1

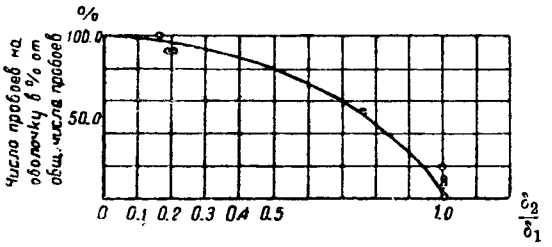


Рис. 2. Число пробоев на свинцовую оболочку в процентах от общего числа пробоев в зависимости от толщины поясной изоляции δ_2 к фазовой δ_1 при испытании в схеме с заземлением одной из фаз

Каждая точка кривой рис. 2 получена в результате 20—30 испытаний при выдержках времени от 2 до 48 h.

В зависимости от соотношения толщин изоляции, вследствие изменения формы и градиентов электрического поля, меняется и механизм пробоя.

Для исследования развития пробоя и выявления слабых мест в различных конструкциях образцы, испытывающиеся повышенным напряжением, подвергались подробному разбору. Рассмотрены были как пробитые образцы, так и образцы, напряжение с которых было выключено за некоторое время до возможного пробоя.

При испытаниях на пробой в схеме с трехфазным симметричным напряжением на всех конструкциях и при всех испытательных напряжениях на поясной изоляции совершенно отсутствовали следы каких-либо разрушений. Это наблюдалось на всех образцах вплоть до пробоя кабеля (между жилами). В фазовой же изоляции пробитых образцов и образцов, снятых за некоторое время до пробоя, наблюдались резко выраженные следы ионизации и ветвистые побеги от тангенциальных градиентов. Бумага вокруг ветвистых побегов сильно высохла. Наибольшее количество ветвистых побегов находится на внешних слоях жильной изоляции, на части фазы, обращенной к середине кабеля, т. е. в треугольнике, ограниченном тремя фазами, где, как известно, тангенциальные градиенты достигают наибольших значений (рис. 3).

При резко выраженных побегах часть из них обходит фазу кругом. Ветвистые побеги обычно распространяются по всей длине образца, но не равномерно, а пятнами, с наибольшей глубиной проникновения в толщу изоляции у будущего места пробоя.

На внутренних слоях жильной изоляции следы ионизации почти не обнаружены.

Место пробоя находится обычно в середине зоны наиболее интенсивных следов ионизации, и пробой происходит между двумя или тремя жилами. За несколько часов до пробоя почти все образцы значительно разогреваются.

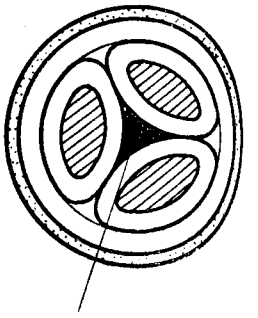


Рис. 3

Из вышеизложенного видно, что при трехфазном симметричном напряжении пробой обусловлен тангенциальными градиентами. Разрушение изоляции при длительном выдерживании под повышенным напряжением развивалось с внешних слоев жильной изоляции и со временем проникало все глубже и глубже в толщу жильной изоляции, разогревая кабель, пока не наступал тепловой пробой между жилами.

При испытаниях трехфазным напряжением с заземленной фазой характер разрушения изоляции зависит от соотношения толщин изоляции. Когда толщины равны, развитие и характер разрушения изоляции не отличается от описанного процесса пробоя при испытаниях в схеме с симметричным трехфазным напряжением, т. е. пробой происходит между жилами и обусловлен тангенциальными градиентами в жильной изоляции. При уменьшении толщины поясной изоляции до 16% толщины жильной[1] при испытаниях трехфазным напряжением с заземленной фазой пробой всегда происходил с одной из жил на оболочку, причем пробоем на фазе захватывалась изоляция у бокового закругления сектора. При этом сперва возникали частичные пробои поясной изоляции и заполнителя, расположенного между свинцовой оболочкой и жилами, находящимися под линейным напряжением.

Эти частичные пробои в виде черных пятен диаметром около 2—3 mm и проколов диаметром порядка 1 mm образуются по всей длине испытуемого кабеля и особенно в местах, наиболее благоприятных для пробоя, в смысле сочетания стыков и совпадений лент по толще изоляции. С внутренней стороны эти черные пятна соприкасаются с боковыми закруглениями одного из секторов фазы. В большинстве случаев черное пятно приходится на заполнитель, проходит через него внутрь между фазами, находящимися под линейным напряжением. На жильной изоляции ветвистые побеги наиболее резко выражены у прожже-

[1] Толщина жильной изоляции — 3 mm, поясной—0,5.

ных пятен в поясной изоляции. На верхних лентах жильной изоляции также наблюдаются черные пятна. Пробой происходит в одном из черных пятен на поясной изоляции, в месте сильно развитых ветвистых побегов в жильной изоляции.

Все испытания проводились с кабелями сечением 50—70 mm². Полученные из этих испытаний выводы мы считали возможным распространить на кабели всех сечений по следующим соображениям:

а) По существующей практике у нас и за границей толщины изоляции для 6 ÷ 10-kV кабелей выбирают обычно независимо от сечений.

б) В кабелях большего сечения градиенты, как правило, будут несколько меньше, и запас прочности кабелей бо́льших сечений будет несколько выше.

в) Применительно к кабелям меньшего сечения, вследствие возрастания в них тангенциальных градиентов в жильной изоляции, выводы о целесообразности изменения соотношения толщин жильной и поясной изоляции могут быть сформулированы еще более резко.

Анализ результатов. Из механизма разрушения изоляции и соотношения числа пробоев между жилами и жил на оболочку следует, что принятое в ОСТ 6260 равенство толщин жильной и поясной изоляции нерационально, так как и при симметричном трехфазном напряжении и при заземлении одной фазы слабым местом является жильная изоляция. Увеличение толщины поясной изоляции сверх 0,75 толщины жильной практически не увеличивает прочность кабеля даже при заземлении одной из фаз и ведет только к увеличению диаметра кабеля, а следовательно, к лишнему расходу свинца.

Таким образом совершено бесспорно, что от существующей конструкции следует отказаться и перейти на новую конструкцию.

Из каких соображений выбирать толщины изоляции?

Самый простой и естественный способ — выбор толщины изоляции по испытательным напряжениям для кабелей в настоящее время неприменим, так как принятые испытательные напряжения характеризуют значительно меньшую прочность изоляции, чем достигаемая прочность при нормированных толщинах изоляции, даже при весьма посредственном качестве выполнения.

Поэтому при пересмотре конструкции кабеля следует исходить из существующей электрической прочности кабелей и при переходе на новую конструкцию так изменить изоляцию, чтобы при уменьшении размеров кабеля сохранить существующую прочность изоляции или даже ее несколько увеличить.

Нам представляется возможным два решения. Первое заключается в том, чтобы снять излишек поясной изоляции, не увеличивающий запаса прочности кабеля: уменьшить ее до 0,7—0,8 от толщины жильной изоляции. Такое решение приводит к рациональной конструкции «равнопрочного» кабеля, т. е. кабеля, имеющего одинаковую прочность между жилами и между жилами и оболочкой при трехфазном напряжении с заземлением одной из фаз.

При выполнении кабелей по этому варианту получаются следующие толщины изоляции (табл. 3).

Таблица 3

Напряжение в kV	6,0	10,0
δ_1 в mm	2,0	2,75
δ_2 „ „	1,5	2,0
δ_2/δ_1	0,75	0,725

По отношению толщин изоляции кабель получится конструктивно близким к конструкции, распространенной в США (табл. 1). По толщине изоляции с жилы на оболочку конструкция табл. 3 близко подходит к конструкции кабеля, выполненного по английским нормам (табл. 4).

Таблица 4

Номинальное напряжение в kV		6,0	10,0
Толщина изоляции с жил на оболочку в mm	По конструкции равнопрочного кабеля (табл. 3)	3,5	4,75
	Английские нормы . .	3.82	5.34
	ОСТ 6260	4,0	5,5
	Германские нормы . .	3,1	3,7
Толщина изоляции между жилами в mm	По конструкции равнопрочного кабеля (табл. 3)	4,0	5,5
	Английские нормы . .	3,82	5,34
	Германские нормы . . .	5,2	6,4
	ОСТ 6260	4,0	5,5

По использованию изоляции предлагаемый в табл. 3 кабель по нашему мнению рациональнее конструкции по ОСТ 6260 и нормированных в Англии и Германии (одновременно получается экономия свинца).

Второе возможное решение — это перераспределение толщин поясной и жильной изоляции, заключающееся в большем уменьшении толщины поясной изоляции и увеличении толщины жильной. При этом варианте кабель не будет равнопрочным между жилами и между жилами и свинцовой оболочкой в схеме с заземлением одной из фаз.

Электрическая прочность при симметричном трехфазном напряжении будет выше, чем в конструкции по ОСТ 6260, а при трехфазном напряжении с заземлением одной из фаз — того же порядка, но с той лишь разницей, что прочность при несимметричном напряжении будет уже определяться толщиной изолирующего слоя между жилой и свинцовой оболочкой.

Толщины изоляции для такой конструкции кабеля могут быть выбраны [2] из табл. 5.

---

[2] Само собой разумеется, что возможен ряд вариантов конструкций кабелей с перераспределенной изоляцией. Несколько вариантов испытываются в настоящее время в ВЭИ.

Таблица 5

Напряжение в kV	6,0	10,0
δ_1 в mm	2,2	3,0
δ_2 „ „	1,0	1,4

В табл. 6 сопоставлены толщины изоляции, получаемые при втором варианте, с толщинами изоляции по английским и германским нормам.

Таблица 6

Номинальное напряжение в kV		6,0	10,0
Толщина изоляции между жилами и оболочкой в mm	Конструкция кабеля с перераспределенной изоляцией (табл. 5) .	3,2	4,4
	ОСТ 6260	4,0	5,5
	Английские нормы . .	3,82	5,34
	Германские нормы . . .	3,1	3,7
Толщина изоляции между жилами в mm	Конструкция кабеля с перераспределенной изоляцией (табл. 5) .	4,4	6,0
	ОСТ 6260	4,0	5,5
	Английские нормы . .	3,82	5,34
	Германские нормы . . .	5,2	6,4

При пересмотре конструкции 6-й 10-kV кабелей должны быть учтены опыт эксплоатации и соображение экономии цветных металлов, последнее и иллюстрируется табл. 7 и 8.

Таблица 7

Напряжение, kV	Сечение жилы, mm²	Конструкция ОСТ 6260 ($\delta_1 = \delta_2 = 2$ mm)		Конструкция с уменьшенной поясной изоляцией ($\delta_1 = 2{,}0$ mm; $\delta_2 = 1{,}5$ mm)		Конструкция кабеля с перераспределенной изоляцией ($\delta_1 = 2{,}2$ mm; $\delta_2 = 1{,}0$ mm)	
		диаметр кабеля под свинцовой оболочкой, mm	вес свинца в kg на 1 km кабеля	диаметр кабеля под свинцовой оболочкой	вес свинца в kg на 1 km кабеля	диаметр кабеля под свинцовой оболочкой	вес свинца в kg на 1 km кабеля
				в % от конструкции ОСТ 6260		в % от конструкции ОСТ 6260	
6,0	50	28,5	1835,0	96,5	96,5	96,0	96,0
	150	41,0	3230,0	97,5	97,5	97,0	97,0

Таблица 8

Напряжение, kV	Сечение жилы, mm²	Конструкция ОСТ 6260 ($\delta_1 = \delta_2 = 2{,}75$ mm)		Конструкция с уменьшенной поясной изоляцией ($\delta_1 = 2{,}75$; $\delta_2 = 2{,}0$ mm)		Конструкция кабеля с перераспределенной изоляцией ($\delta_1 = 3{,}0$ mm; $\delta_2 = 1{,}4$ mm)	
		диаметр кабеля под свинцовой оболочкой, mm	вес свинца в kg на 1 km кабеля	диаметр кабеля под свинцовой оболочкой	вес свинца в kg на 1 km кабеля	диаметр кабеля под свинцовой оболочкой	вес свинца в kg на 1 km кабеля
				в % от конструкции ОСТ 6260		в % от конструкции ОСТ 6260	
10,0	50	33,3	2395,0	95,5	95,5	95,0	95,0
	150	45,7	3775,0	96,7	96,7	96,5	96,5

В настоящее время пробой вследствие старения изоляции 6 и 10-kV кабелей — исключительно редкое явление. Пробой кабелей на эти напряжения в эксплоатации обусловлен в основном либо внешними механическими повреждениями и дефектами прокладки либо случайными дефектами производства. Сказанное иллюстрируется данными МКС Мосэнерго, полученными из анализа повреждений, выявленных при профилактических испытаниях в 1934 г. [2].

Таблица 9

Причина повреждения	Число повреждений	Число повреждений в % от общего числа
Дефект монтажа и прокладки .	29,0	30,5
Случайные заводские дефекты .	16,0	17,0
Старение	3,0	3,0
Механическое повреждение . .	28,0	29,5
Коррозия и токи в земле . . .	4,0	4,0
Невыясненные	15,0	16,0
Всего	95,0	100,0

Как видно из таблицы, число аварий, объясняемых старением изоляции, ничтожно мало, и это подтверждает, что нет оснований увеличивать толщину жильной изоляции. Утолщение жильной изоляции в конструкциях по последним германским нормам и в конструкции с перераспределенной изоляцией производится только для компенсации уменьшения толщины поясной изоляции.

Мерилом экономичности кабеля является диаметр кабеля под свинцовой оболочкой.

При перераспределении толщины изоляции следует иметь в виду, что уменьшение поясной изоляции на $\Delta\delta$ снижает диаметр кабеля на $2\,\Delta\delta$, а приращение жильной изоляции на $\Delta\delta$ увеличивает диаметр кабеля примерно на величину $3{,}5\,\Delta\delta$.

Поэтому для получения наиболее экономически целесообразной конструкции не следует увеличивать толщину жильной изоляции сверх величин, требуемых для изоляции жил между собою.

Рассмотренные новые конструкции будут иметь меньшие толщины изоляции на землю. В связи с этим возникает необходимость в проверке, будут ли уменьшенные толщины изоляции на землю достаточны с точки зрения кратковременных перенапряжений.

Для выяснения этого были проведены импульсные испытания трехжильных кабелей с различными толщинами изоляции на землю. Результаты испытаний даны в табл. 10.

Как видно, импульсная прочность при кратковременных перенапряжениях весьма велика, и с этой стороны снижение толщины изоляции на землю вполне допустимо. Так, при снижении изоляции на землю до 3,2 mm у 6-kV кабелей и до 4,4 mm у 10-kV импульсная прочность кабелей будет соответственно 220 и 300 kV. Для учета опыта эксплоатации было бы желательно иметь данные о числе и причинах электрических пробоев с жил на оболочку. К сожалению, четких сведений по этому вопросу эксплоатирующие организации до сих пор не имеют.

По имеющемуся материалу число механических

Таблица 10

Толщина изоляции на землю mm	Амплитуда волны при пробое kV	Амплитуда первого импульса kV	Общее число импульсов до пробоя	Примечание
3,5	275	200	24	
3,5	202	200	6	
3,5	223	166	24	
3,5	236	156	30	
3,5	218	190	45	
3,5	248	168	24	
5,5	309	273	42	
5,5	346	273	14	Пробой в разделке
5,5	315	190	54	
3,0	222	170	20	
3,0	222	171	14	

повреждений кабелей значительно больше числа замыканий на землю.

Это, во-первых, показывает, что не всякое механическое повреждение влечет за собой аварию с заземлением фазы, а во-вторых, позволяет с большой достоверностью считать, что аварии, связанные с замыканием на землю, почти исключительно обусловлены механическими повреждениями и дефектами прокладки, а не старением изоляции.

При перемежающемся заземлении в кабельных сетях неоднократно наблюдались, одновременно в различных точках сети, пробои изоляции на землю. Однако эти пробои отнюдь не указывают на недостаточность изоляции на землю и не служат противопоказанием на снижение толщины изоляции, так как все пробои при перемежающемся заземлении происходят в местах механических дефектов. Правильность этого подкрепляется данными из профилактических испытаний, проведенных МКС Мосэнерго в 1934 г.

При этих испытаниях на 100 km испытанного кабеля происходило в среднем 12 пробоев. Напряжение поднимали ступенями через 5 kV до 20 kV постоянного тока. При 5, 10 и 15 kV напряжение выдерживалось по 2 min, при 20 kV — 4 min. Полученное распределение числа пробоев в местах старых механических повреждений в зависимости от величины испытательного напряжения дано в табл. 11.

Таблица 11

Испытательное напряжение в kV	5,0	10,0	15,0	20,0
Число пробоев на 100 km испытанного кабеля	1,9	2,3	3,0	4,8

При перемежающихся заземлениях перенапряжения в 6-kV кабельной сети достигают 20—30 kV и ими охватывается сеть протяженностью 200—400 km. Поэтому вполне возможны при дуговом заземлении пробои на месте старых механических повреждений, если сеть длительно не подвергалась профилактическим испытаниям. Это указывает только на необходимость периодических профилактических испытаний.

Выводы. 1. Конструкция трехжильных кабелей на напряжение 6—10 kV с равными толщинами жильной и поясной изоляции нерациональна и недостаточно экономична вследствие отсутствия координации изоляции между жилами и жил на оболочку.

2. Новая конструкция трехжильных кабелей с поясной изоляцией должна выполняться с меньшей толщиной поясной изоляции по сравнению с жильной, т. е. толщина изоляции между жилами должна быть больше толщины изоляции с жил на оболочку.

3. В основу новой конструкции может быть положен принцип равнопрочного кабеля (табл. 3) или принцип кабеля «с перераспределенной изоляцией» (табл. 5).

4. Окончательный выбор новой конструкции и толщин изоляции трехжильных кабелей на напряжение 6 и 10 kV с поясной изоляцией должен быть сделан после сравнительного испытания на опытных линиях нескольких конструкций с различными толщинами изоляции в условиях, близких к эксплоатационным.

Литература

1. «Электричество» № 16, 1937, стр. 34.
2. «Бюллетень Мосэнерго» № 6—7, 1934.
3. ETZ № 38, 1934. Нормы VDE.
4. The Electrical Power Engineer, 1935, стр. 735.

Параллельная компенсация линий электропередачи с помощью насыщенных дросселей

П. С. Жданов
ВЭИ

ПРИМЕНЕНИЕ параллельной компенсации длинных линий передачи позволяет удовлетворительно осуществлять режимы холостого хода и, особенно, синхронизационные режимы линий и повышает устойчивость параллельной работы станций. Если холостой ход линии предъявляет требования к компенсатору лишь в отношении его мощности, то для устойчивости существенное значение имеет не только мощность компенсатора, влияющая на величину э. д. с. станции, но и производная ее по напряжению, определяющая стабилизирующий эффект компенсатора при небольших приращениях угла сдвига э. д. с. Чем больше стабилизирующий (регулирующий) эффект компенсатора, тем в меньшей степени падает напряжение при увеличении угла и тем большей, следовательно, получается синхронизирующая мощность при данной э. д. с. станции. Так например, промежуточный синхронный компенсатор, работающий вхолостую, не влияя на э. д. с. генераторов, тем не менее повышает синхронизирующую мощность в результате увеличения регулирующего эффекта в промежуточной точке [1]. В этом и заключается идея известной схемы Баума с промежуточными синхронными компенсаторами. Практически, однако, синхронизирующая мощность с увеличением регулирующего эффекта возрастает довольно медленно, и для получения заметных результатов необходим весьма значительный регулирующий эффект, тогда как эффект синхронных компенсаторов, вообще говоря, очень невелик, а при известных условиях может даже сделаться отрицательным.

Невелик также эффект и шунтирующих дросселей с линейной характеристикой, включаемых по предложению А. А. Вульф в начале линии передачи. Установка шунтирующих дросселей тем не менее безусловно целесообразна в связи с достигаемым при этом повышением э. д. с. генераторов. Если бы одновременно каким-либо путем удалось повысить регулирующий эффект шунтирующих дросселей хотя бы вдвое, то такие дроссели, увеличивая э. д. с. генераторов и в то же время обладая большим регулирующим эффектом, могли бы явиться исключительно эффективным средством повышения статической устойчивости систем передачи.

Эту задачу решает насыщение сердечника дросселей. При этом оказывается возможным получить производную тока по напряжению (рис. 1), а следовательно, и регулирующий эффект.

$$\frac{dQ_{др}}{dU} = U\frac{dI}{dU} + I \qquad (1)$$

в несколько раз большим, нежели у дросселя с линейной характеристикой.

[1] П. С. Жданов, Статическая устойчивость протяженных систем электропередачи, „Электричество" № 11, 1937.

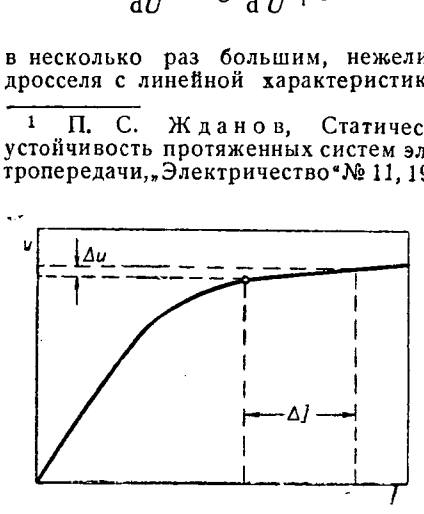


Рис. 1

Характеристики насыщенных дросселей. Простейшим видом насыщенного дросселя может явиться обычный трансформатор с сечением сердечника, уменьшенным до такой степени, чтобы намагничивающий ток сделался равным номинальному току трансформатора. При величине намагничивающего тока мощных трансформаторов порядка 4—4,5% и индукции 14 000—14 500 G, используя трансформатор в качестве дросселя, индукцию можно довести до 20 000 при 400 aw/cm.

Получаемая при этом зависимость потокосцеплений потока в железе от тока показана пунктиром на рис. 2.

Полагая, что до 20% магнитного потока замыкается частично через воздух, все же можно получить весьма значительный регулирующий эффект, достигающий $\frac{dQ_{др}}{dU} = 5{,}2$ (для основной гармоники).

Нелинейность характеристики дросселя, естественно, влечет за собой появление высших гармоник фазовых токов, которые в линейных токах должны быть компенсированы или устранены. Практически вполне достаточна компенсация третьей, седьмой и девятой гармоник фазового тока, так как высшие гармоники крайне невелики. При соединении рабочей обмотки дросселя в звезду третья и девятая гармоники фазового тока и напряжения почти целиком устраняются компенсационной обмоткой, соединенной в треугольник. Возможность компенсации пятой и седьмой гармоник исследована ниже.

Необходимо отметить самую тесную связь, существующую между величиной гармоник и регулирующим эффектом дросселя. Попытки достичь того же эффекта при меньших гармониках тока, изменяя форму характеристики [2] $\psi = f(I)$, не приводят к удовлетворительному результату.

Зависимость величины гармоник от регулирующего эффекта иллюстрирует рис. 3. Точка $\frac{dQ}{dU} = 2$ соответствует дросселю с линейной характеристикой. С увеличением эффекта гармоники довольно быстро возрастают и уже при $\frac{dQ}{dU} = 3$ сумма пятой и седьмой гармоник достигает 5% и становится необходимой компенсация их. При регулирующем эффекте $\frac{dQ}{dU} = 5$ и выше уже третья гармоника

[2] Путем насыщения отдельных участков магнитопровода и введения воздушного зазора.

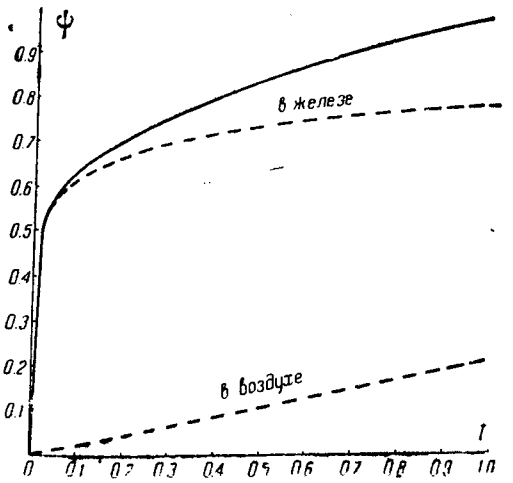


Рис. 2

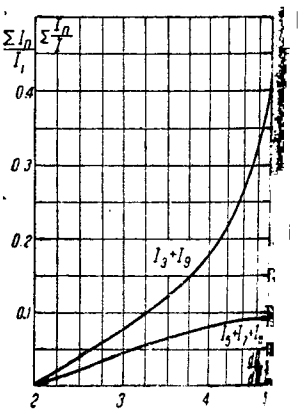


Рис. 3

остигает чрезмерно больших значений. Хотя эта гармоника на линейный ток и напряжение почти не влияет, но может вызвать значительное увеличение потерь и стоимости дросселя. Во всяком случае при компенсации пятой и седьмой гармоник можно считать обеспеченной величину регулирующего эффекта порядка $4 \div 5$. Ориентируясь на эти цифры, мы попытаемся установить влияние насыщенных дросселей, включенных в начале линии на величину внутреннего предела мощности в схеме, близкой по своим параметрам к системе Куйбышев — Москва (рис. 4).

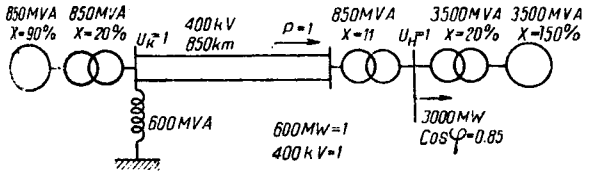


Рис. 4

Повышение устойчивости. В нормальном режиме по двухцепной линии длиною 850 km при напряжении 400 kV передается мощность 600 MW. Параметры линии: $a = 0{,}421\ \Omega$/km; $b = 3{,}1 \cdot 10^{-6}$ S/km на цепь.

Мощность дросселя равна 600 MVA, что дает для генераторов в нормальном режиме $\cos\varphi = 0{,}84$.

Напряжение в начале линии $U_к$ и напряжение на шинах приемника $U_н$ при любом значении передаваемой мощности поддерживаются неизменными регулировкой э. д. с. генераторных станций.

При данной величине передаваемой мощности синхронизирующая мощность вычисляется при постоянстве э. д. с. с учетом снижения напряжений как в начале линии, так и на шинах приемника. Таким образом в расчетах должен быть учтен регулирующий эффект не только дросселей, но и нагрузки.

Задачей расчета является определение производной $\frac{dP}{d\delta}$ при различной величине передаваемой мощности. Угол δ между э. д. с. генераторных станций можно получить как сумму углов отдельных участков схемы:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 - \delta_3 = \delta_{12} - \delta_3, \qquad (2)$$

где δ_1 — угол между э. д. с. передающей станции E_1 и напряжением в начале линии U_k, δ_2 — между напряжениями в начале линии U_k и на шинах приемника $U_н$, δ_3 — угол между э. д. с. местной станции E_3 и напряжением приемника $U_н$. Рассматривая сначала систему передачи независимо от характеристик приемника, можно вычислить производные активной и реактивной мощности, отдаваемой приемнику: $\frac{dP}{d\delta_{12}}$, $\frac{dQ}{d\delta_{12}}$ при $U_н = \text{const}$ и $\frac{dP}{dU_н}$ и $\frac{dQ}{dU_н}$ при $\delta_{12} = \text{const}$.

При $U_н = \text{const}$

$$\frac{dP}{d\delta_{12}} = \frac{\frac{\partial P}{\partial U_k} + \frac{\partial P}{\partial \delta_2}\frac{d\delta_2}{dU_k}}{\frac{d\delta_1}{dU_k} + \frac{d\delta_2}{dU_k}}, \qquad (3)$$

$$\frac{dQ}{d\delta_{12}} = \frac{\frac{\partial Q}{\partial U_k} + \frac{\partial Q}{\partial \delta_2}\frac{d\delta_2}{dU_k}}{\frac{d\delta_1}{dU_k} + \frac{d\delta_2}{dU_k}}, \qquad (4)$$

$$\left.\begin{aligned} \frac{d\delta_1}{dU_k} &= \frac{B_k}{\Delta}\frac{\partial P}{\partial \delta_2}, \\ \frac{d\delta_2}{dU_k} &= \frac{B_k}{\Delta}\frac{\partial P}{\partial \delta_1}, \\ \Delta &= \begin{vmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P}{\partial \delta_2} \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_1} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} \end{vmatrix}, \\ B_k &= \frac{dQ_k}{dU_k} - \left(\frac{\partial Q_1}{\partial U_k} - \frac{\partial Q_2}{\partial U_k}\right), \end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

Q_1 — реактивная мощность за повышающим трансформатором,

Q_2 — в начале линии.

При $\delta_{12} = \text{const}$

$$\left.\begin{aligned} \frac{dP}{dU_н} &= \frac{\partial P}{\partial U_н} + \frac{\partial P}{\partial \delta_2}\frac{d\delta_2}{dU_н} + \frac{\partial P}{\partial U_k}\frac{dU_k}{dU_н}, \\ \frac{dQ}{dU_н} &= \frac{\partial Q}{\partial U_н} + \frac{\partial Q}{\partial \delta_2}\frac{d\delta_2}{dU_н} + \frac{\partial Q}{\partial U_k}\frac{dU_k}{dU_н}, \end{aligned}\right\} \qquad (6)$$

где

$$\left.\begin{aligned} \frac{d\delta_2}{dU_н} &= \frac{-\frac{\partial P}{\partial U_н}}{\frac{\partial P}{\partial \delta_1} + \frac{\partial P}{\partial \delta_2}}, \\ \frac{dU_k}{dU_н} &= \frac{\frac{\partial P}{\partial U_н}\left(\frac{\partial Q_1}{\partial \delta_1} + \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2}\right) - \frac{\partial Q_2}{\partial U_н}\left(\frac{\partial P}{\partial \delta_1} + \frac{\partial P}{\partial \delta_2}\right)}{\left(\frac{\partial P}{\partial \delta_1} + \frac{\partial P}{\partial \delta_2}\right)B_k}. \end{aligned}\right\} \qquad (7)$$

Переходя ко всей системе в целом, производные $\frac{dP}{d\delta_{12}}$, $\frac{dQ}{d\delta_{12}}$, $\frac{dP}{dU_н}$ и $\frac{dQ}{dU_н}$ можно рассматривать как частные производные активной и реактивной мощности одной из двух параллельно работающих станций.

Вычислив соответствующие производные $\left(\frac{\partial P_3}{\partial \delta_3}, \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_3}, \frac{\partial P_3}{\partial U_н}\right.$ и $\left.\frac{\partial Q_3}{\partial U_н}\right)$ для второй — местной — станции, можно найти синхронизирующую мощность $\frac{dP}{d\delta}$:

$$\frac{dP}{d\delta} = \frac{\frac{\partial P}{\partial U_н} + \frac{\partial P}{\partial \delta_{12}}\frac{d\delta_{12}}{dU_н}}{\frac{d\delta_{12}}{dU_н} - \frac{d\delta_3}{dU_н}}, \qquad (8)$$

где

$$\left.\begin{aligned} \frac{d\delta_{12}}{dU_н} &= \frac{\begin{vmatrix} A_н & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} \\ B_н & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_3} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta_{12}} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta_{12}} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_3} \end{vmatrix}}, \\ \frac{d\delta_3}{dU_н} &= \frac{\begin{vmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta_{12}} & A_н \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta_{12}} & B_н \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta_{12}} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta_{12}} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_3} \end{vmatrix}}, \\ A_н &= \frac{dP_н}{dU_н} - \left(\frac{\partial P}{\partial U_н} + \frac{\partial P_3}{\partial U_н}\right), \\ B_н &= \frac{dQ_н}{dU_н} - \left(\frac{\partial Q}{\partial U_н} + \frac{\partial Q_3}{\partial U_н}\right). \end{aligned}\right\} \qquad (9)$$

На рис. 5 приведены результаты расчета при одной и той же мощности, но при различной величине регулирующего эффекта дросселей. Эти результаты в полной мере подтверждают предположение об эффективности насыщенных дросселей.

Увеличение регулирующего эффекта с 2 (ненасыщенные дроссели) до 3 повышает предел передаваемой мощности с 1,213 до 1,323, т. е. на 9%; при регулирующем эффекте 4 предел мощности возрастает уже до 1,393, т. е. на 15%!

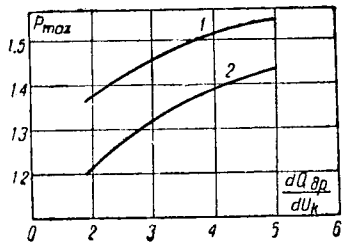


Рис. 5. *1* — шины бесконечной мощности, *2* — с учетом характеристик приемника

Допустимая величина передаваемой мощности в системах, подобных рассматриваемой, определяется в первую очередь статическим пределом мощности. Поэтому увеличение этого предела на 15% равносильно повышению пропускной способности линии на ту же цифру.

Проблема динамической устойчивости имеет здесь подчиненное значение и может быть успешно решена другими средствами. Тем не менее следует отметить, что насыщение дросселей приводит к некоторому повышению и динамической устойчивости.

На рис. 6 показаны характеристики мощности при двухполюсном замыкании на землю в начале линии для той же системы передачи, что и раньше. Нейтрали трансформаторов заземлены через реактанц 30%. Короткое замыкание ликвидируется выключением участка одной из цепей линии передачи длиною 170 km.

Как видно на рис. 6, насыщение дросселей сказывается, главным образом, на характеристике мощности при выключенном к. з. При характеристике дросселя, обеспечивающей регулирующий эффект в нормальном режиме 4,1, предельное время выключения к. з. достигает 0,20 sec, сравнительно с 0,17 sec при ненасыщенном дросселе.

Компенсация гармоник. Как указывалось выше, пятая и седьмая гармоники тока при большом регулирующем эффекте достигают значительной величины и должны быть компенсированы. Применение для этой цели резонансных контуров и фильтров при высоком напряжении и больших мощностях дросселей затруднительно. Задача удовлетворительно может быть решена параллельным включением двух трехфазных групп дросселей, магнитные потоки которых сдвинуты на 30°.

Наиболее простым является, повидимому, включение одной группы звездой (с компенсационной обмоткой в треугольник) и другой — треугольником. Возможность компенсации пятой и седьмой гармоник в этом случае связано с тем обстоятельством, что эти гармоники в линейных токах обеих групп дросселей направлены **противоположно**.

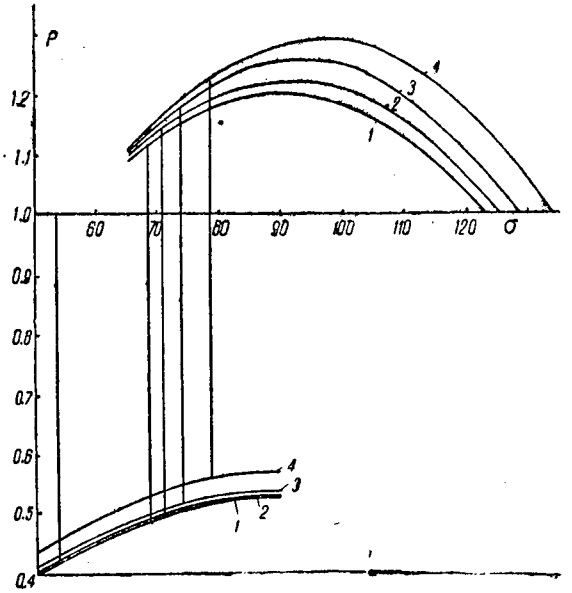


Рис. 6. *1* — ненасыщенные дроссели $\left(\frac{dQ}{dU}\right) = 2$; *2*, *3* и *4* — для значений $\left(\frac{dQ}{dU}\right)_{U=1}$, соответственно 3,2; 4,1 и 5,2

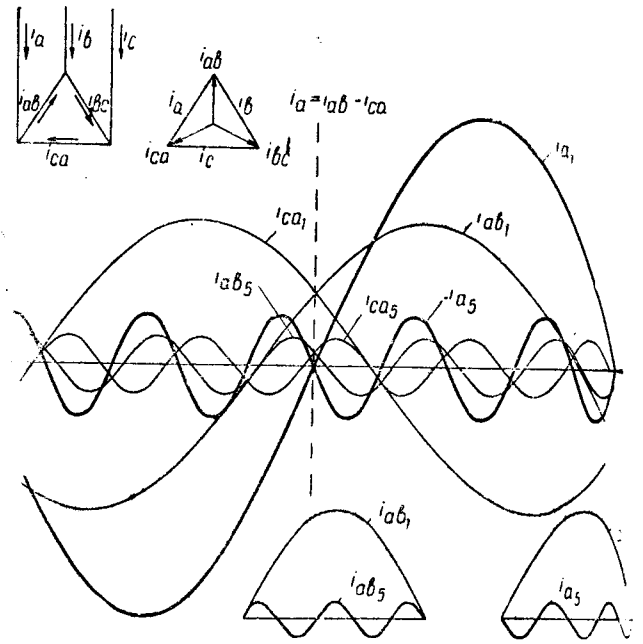


Рис. 7

На рис. 7 показано протекание пятой гармоники в фазовом (i_{ca} и i_{ab}) и в линейном (i_a) токах группы, соединенной в треугольник. Эта гармоника в линейном токе возрастает в $\sqrt{3}$ раз, так же как и основная, меняя одновременно свой знак.

При соединении дросселя в звезду фазовый и линейный токи одинаковы. Следовательно, пятая гармоника в линейных токах звезды и треугольника имеет обратные знаки в линейном же токе обеих групп она должна отсутствовать. Аналогичная картина получается и для седьмой гармоники.

Отметим, что соединение в зигзаг дает то же направление пятой и седьмой гармоник в линейном токе, что и треугольник, т. е. противоположное звезде.

Обозначая при соединении в зигзаг через I ампер-витки стержня (т. е. двух обмоток, расположенных на одном стержне) и через i — ампер-витки одной из обмоток стержня, можно написать:

$$\left.\begin{aligned} I_a &= i_a - i_c, \\ I_b &= i_b - i_a, \\ I_c &= i_c - i_b, \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

откуда

$$i_a = \frac{I_a - I_b}{3}$$

и т. д.

При этом, как показывает рис. 8, пятая гармоника в линейном токе I_a имеет направление, противоположное направлению той же гармоники ампер-витков стержня, а сле-

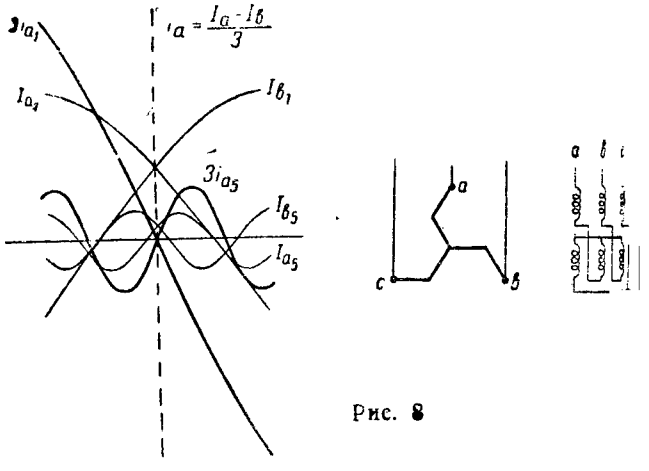


Рис. 8

довательно, и направлению пятой гармоники тока дроссе-ля, соединенного в звезду.

Известным недостатком соединения в зигзаг является возникновение третьей гармоники магнитного потока, так как третья гармоника тока в рабочей обмотке протекать не может. Однако его легко устранить с помощью компенсационной обмотки, соединенной в треугольник, так же как и при соединении рабочих обмоток в звезду.

Вообще при соединении дросселей в треугольник или зигзаг магнитные потоки сдвинуты на 30° относительно потоков группы, соединенной в звезду. Линейные токи пропорциональны разности ампер-витков двух фазовых сердечников.

В обоих случаях они равны:

$$\Sigma A_n \sin[n(30+\omega t)] - \Sigma A_n \sin[n(30-\omega t)] = = \Sigma 2A_n \cos(n30)\sin(n\omega t). \quad (11)$$

Если гармоники фазовых ампер-витров считать положительными, то гармоники линейных токов равны:

$$\begin{array}{rl} n=1 & \sqrt{3}\,A_1 \sin\omega t \\ 3 & 0 \\ 5 & -\sqrt{3}\,A_5 \sin 5\omega t \\ 7 & -\sqrt{3}\,A_7 \sin 7\omega t \\ 9 & 0 \\ 11 & \sqrt{3}\,A_{11} \sin 11\omega t \\ 13 & \sqrt{3}\,A_{13} \sin 13\omega t \\ 15 & 0 \\ 17 & -\sqrt{3}\,A_{17} \sin 17\omega t \\ 19 & -\sqrt{3}\,A_{19} \sin 19\omega t \\ 21 & 0 \end{array} \quad (12)$$

и т. д.

Иначе говоря, при параллельном включении с группой, соединенной в звезду, компенсируются 5, 7, 17, 19 и т. д. гармоники. Гармоники, кратные трем, в линейном токе отсутствуют вовсе.

Выше было указано, что при соединении дросселей в звезду третья гармоника в фазовом напряжении устраняется компенсационной обмоткой. Однако влияние рассеяния компенсационной обмотки заставляет внести сюда некоторые коррективы.

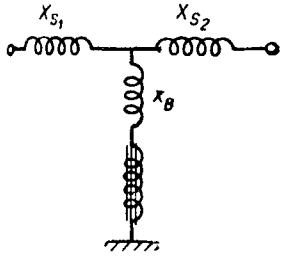


Рис. 9

На рис. 9 дана схема замещения дросселя с компенсационной обмоткой, где X_{s_1} и X_{s_2} — индуктивности потоков рассеяния компенсационной и рабочей обмоток; $X_{s_1}+X_B$ и $X_{s_2}+X_B$ — индуктивности воздушных потоков, сцепленных с каждой из обмоток. Гармоники тока, кратные трем, замыкаются через реактанц X_{s_1}; все остальные гармоники протекают через реактанц X_{s_2}. Падение напряжения в реактанце рассеяния компенсационной обмотки $i_3 3X_{s_1}$ обусловливает существование третьей гармоники взаимного потока, а следовательно, и третьей гармоники фазового напряжения рабочей обмотки. Если нейтраль дросселя заземлена, то в линейных токах могут возникнуть третьи гармонические, замыкающиеся через заземленные нейтрали трансформаторов и емкость линии.

Дальнейшие осложнения уже в отношении пятой и седьмой и других гармоник возникают, если индуктивности потоков рассеяния, или вообще потоков в воздухе, рабочей и компенсационной обмоток не равны друг другу, что обычно и имеет место.

При параллельном включении групп, соединенных в звезду и в треугольник, гармоники линейных токов в обеих группах получаются одинаковыми по величине лишь при условии, что индуктивности рассеяния рабочих обмоток обеих групп и компенсационной обмотки группы, соединенной в звезду, равны друг другу.

Третья гармоника тока при соединении в треугольник протекает в рабочей обмотке, при соединении же в звезду — в компенсационной обмотке.

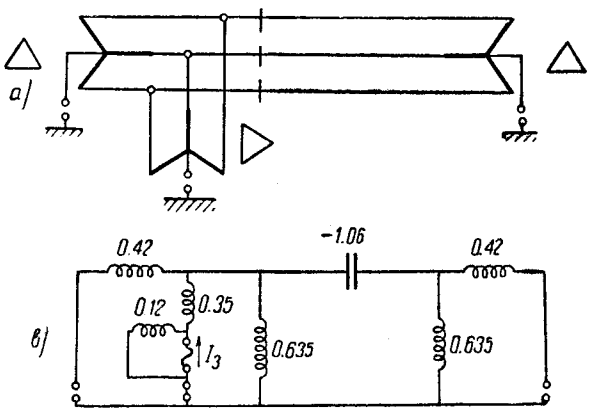


Рис. 10

Если индуктивности рассеяния этих обмоток неодинаковы, то различны также и третьи гармоники взаимных магнитных потоков (и токов) в обеих группах.

Различие формы кривой потоков влечет за собой неравенство пятой и седьмой и других гармоник токов. В результате нарушается в той или иной степени компенсация этих гармоник линейных токов.

Имеющиеся в настоящее время данные о величине реактанцев рассеяния отдельных обмоток довольно скудны, однако есть основание думать, что реактанц внешней рабочей обмотки может значительно превышать реактанц внутренней, компенсационной обмотки.

В опытах Е. Г. Марквардта [3] на небольшой модели отношение реактанцев рассеяния внешней и внутренней обмоток достигало 2,65. Принимая это отношение равным 3,0, мы установили величину третьей гармоники в линейном токе и степень нарушения компенсации пятой и седьмой гармоник для системы, изображенной на рис. 4, при регулирующем эффекте дросселей 4,1.

Принципиальная схема для третьей гармоники дана на рис. 10. Мощность группы, соединенной в звезду, — $P_Д$ = = 0,5. Реактанц рассеяния рабочей обмотки для третьей гармоники, отнесенный к базисной мощности, равен $X_Д$ = = 0,70 и компенсационной обмотки — $X_Δ$ = 0,24. Параметры линии для третьей гармоники существенно отличны от принятых выше, во-первых, из-за тройной частоты и, во-вторых, из-за совпадения гармоник по фазе. Для линии: $X = 3{,}6$ Ω/km; $b = 6{,}10^{-6}$ S/km. При этом параметры П-образной схемы замещения линии довольно необычны. Последовательно включенной оказывается емкость и параллельно — индуктивности.

Ниже величина третьей гармоники тока дросселя найдена равной 0,236 или, отнеся к базисной мощности системы, $I_з = 0{,}118$.

При этом, предполагая нейтрали трансформаторов и дросселя глухо заземленными, можно получить следующие значения третьей гармоники тока и напряжения трансформаторов и линии:

ток в рабочей обмотке дросселя $I_{з_{др}} = 0{,}184\,I_з \approx 0{,}022$;
„ повышающего трансформатора $I_{з_{тр}} = 0{,}161\,I_з \approx 0{,}019$;
„ в линии $I_{з_л} = 0{,}023\,I_з \approx 0{,}003$;
напряжение в начале линии $U_{з_л} = 0{,}068\,I_з \approx 0{,}008$.

Картина получается довольно благоприятной. Ток в трансформаторе не превышает 2%, ток и напряжение линии составляют лишь долю процента.

Однако и эти цифры могут быть уменьшены с помощью довольно простого мероприятия, а именно — заземления нейтрали дросселя через импидор.

При реактанце импидора 30% (к мощности дросселя и при основной частоте) третьи гармоники тока и напряжения уменьшаются до следующих значений:

$$I_{з_{др}} = 0{,}036\,I_з = 0{,}0042;$$
$$I_{з_{тр}} = 0{,}031\,I_з = 0{,}0037;$$
$$I_{з_л} = 0{,}004\,I_з = 0{,}0005;$$
$$U_{з_л} = 0{,}013\,I_л = 0{,}0015,$$

т. е. практически сводятся к нулю.

[3] «Электричество» № 23, 1936.

Также небольшим оказывается и нарушение компенсации пятой и седьмой гармоник, несмотря на большую разницу реактанцев рассеяния обмоток дросселя.

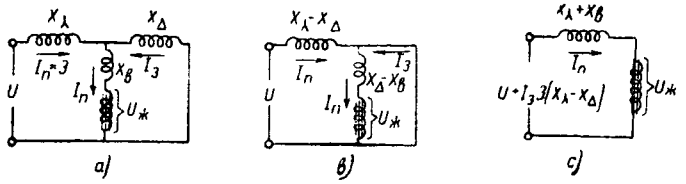


Рис. 11

Приведенная на рис. 11, *а* схема замещения дросселя эквивалентна схеме *b* того же рисунка, для которой при намагничивающем токе $i = I_1 \sin \omega t + I_3 \sin 3\omega t + I_5 \sin 5\omega t + I_7 \sin 7\omega t + \ldots$
справедливо равенство:

$$U \sin y = U_{ж} + I_1 (X_Δ + X_в) \sin y - I_3 3 (X_Δ + X_в) \sin 3y + I_5 (X_Δ + X_в) \sin 5y - I_7 7 (X_Δ + X_в) \sin 7y + \ldots + I_1 (X_Λ - X_Δ) \sin y + I_5 5 (X_Λ - X_Δ) \sin 5y - I_7 7 (X_Λ - X_Δ) \sin 7y - I_{11} 11 (X_Λ - X_Δ) \sin 11y + \ldots =$$

$$= U_{ж} + \Sigma (-1)^{\frac{n+3}{2}} I_n n (X_Δ + X_в) \sin ny + \sum_{n \neq 3,9,\ldots} (-1)^{\frac{n+3}{2}} I_n n (X_Λ - X_Δ) \sin ny, \quad (13)$$

где

$$y = \omega t + \frac{\pi}{2}.$$

Прибавляя к обеим частям равенства по

$$\sum_{n=3,9,\ldots} (-1)^{\frac{n+3}{2}} I_n n (X_Λ - X_Δ) \sin ny,$$

получаем:

$$U \sin y + \sum_{n=3,9,\ldots} (-1)^{\frac{n+3}{2}} I_n n (X_Λ - X_Δ) \sin ny = = U_{ж} + \Sigma (-1)^{\frac{n+3}{2}} I_n n (X_Λ + X_в) \sin ny. \quad (14)$$

Правая часть уравнения представляет собой сумму $U_{ж}$ и падения напряжения в реактанце $(X_Λ + X_в)$ от всех гармоник тока, включая кратные трем. Следовательно, левую часть можно рассматривать как напряжение, приложенное к дросселю с реактанцем $(X_Λ + X_в)$, в рабочей обмотке которого могут протекать все гармоники тока (рис. 11, *с*). Таким образом гармоники тока дросселя, соединенного в звезду (с компенсационной обмоткой), могут быть получены в предположении, что все гармоники, включая кратные трем, протекают по рабочей обмотке. При этом, однако, приложенное фазовое напряжение должно содержать гармоники, равные

$$\sum_{n=3,9,\ldots} (-1)^{\frac{n+3}{2}} I_n n (X_Λ - X_Δ) \sin ny,$$

и может быть найдено путем последовательных приближений. Ниже приводятся величины гармоник тока групп, соединенных в звезду (с компенсационной обмоткой) и в треугольник. Реактанцы дросселя, соединенного в звезду, были приняты равными: $X_Λ = 0{,}15$; $X_Δ = 0{,}05$; $X_в = 0{,}05$, а дросселя, соединенного в треугольник: $X = 0{,}20$ (отнесена к мощности UI_{max}, где I_{max} — амплитуда тока дросселя, соединенного в треугольник). Гармоники фазовых токов получились равными:

Треугольник	Звезда
$I_1 = 0{,}5 / \sqrt{3}$	$I_1 = 0{,}5$
$I_3 = -0{,}1002 / \sqrt{3}$	$I_3 = -0{,}118$
$I_5 = 0{,}0362 / \sqrt{3}$	$I_5 = 0{,}0457$
$I_7 = -0{,}0088 / \sqrt{3}$	$I_7 = -0{,}0127$
$I_9 = 0{,}0009 / \sqrt{3}$	$I_9 = 0{,}0009$
$I_{11} = 0{,}0002 / \sqrt{3}$	$I_{11} = 0{,}0006$

Линейные токи равны при этом:

Треугольник	Звезда	Оба дросселя
$I_1 = 0{,}5$	$I_1 = 0{,}5$	$I_1 = 1{,}0$
$I_3 = 0$	$I_3 = -0{,}0042^*$	$I_3 = -0{,}0042$
$I_5 = -0{,}0362$	$I_5 = 0{,}0457$	$I_5 = 0{,}0095$
$I_7 = 0{,}0088$	$I_7 = -0{,}0127$	$I_7 = -0{,}0039$
$I_9 = 0$	$I_9 \cong 0$	$I_9 \approx 0$
$I_{11} = 0{,}0002$	$I_{11} = 0{,}0006$	$I_{11} = 0{,}0008$

Все гармоники в линейном токе обоих дросселей достаточно малы. Пятая и седьмая гармоники в сумме не превышают 1,4%.

Дальнейшее уменьшение пятой и седьмой гармоник может быть достигнуто изменением характеристики $\psi = f(i)$ дросселя, соединенного в треугольник, в сторону некоторого повышения этих гармоник тока при одновременном увеличении регулирующего эффекта. При этом сумма пятой и седьмой гармоник в линейном токе дросселей может быть доведена до десятых долей процента.

Если вместо соединения в треугольник применяется соединение в зигзаг, то компенсация пятой и седьмой гармоник вообще не должна нарушаться, так как в этом случае у обоих дросселей, звезда и зигзаг, третья гармоника тока протекает в компенсационных обмотках, имеющих примерно одинаковые реактанцы рассеяния.

Отметим, что при соединении в зигзаг третья гармоника тока в рабочей обмотке не возникает вовсе, даже при глухом заземлении нейтрали.

Таким образом при соединении одной группы дросселей в треугольник или в зигзаг и другой — в звезду все гармоники в линейном токе могут быть уменьшены практически до нуля, и, следовательно, задачу устранения гармоник можно считать исчерпывающе разрешенной.

Разумеется, стоимость насыщенных дросселей несколько превысит стоимость дросселей с линейной характеристикой и приблизится к стоимости трансформаторов.

Однако если даже допустить, что стоимость дросселей при насыщении их возрастает вдвое, то для системы, изображенной на рис. 4, это равносильно повышению общей стоимости передачи (т. е. линии, трансформаторов и дросселей) лишь на 2%. Пропускная же способность линии возрастает при этом на 15%.

Промежуточные компенсаторы. Для устранения эффекта Ферранти при большой длине линии передачи емкость линии должна быть компенсирована не только в начале линии, но и в промежуточных точках. Эту задачу решает схема Баума с промежуточными синхронными компенсаторами, не дающая, однако, удовлетворительных результатов в отношении устойчивости системы.

Нормальная величина передаваемой мощности составляет лишь часть естественной мощности линии, и промежуточные синхронные компенсаторы даже в нормальном режиме должны работать недовозбужденными. В подобных условиях целесообразно одновременно с синхронными компенсаторами в промежуточных точках установить дроссели. Такая модификация схемы Баума, уменьшая потребную для регулирования мощность промежуточных синхронных компенсаторов, обещает быть достаточно эффективной и с точки зрения устойчивости при насыщении промежуточных дросселей.

Для рассматриваемой нами системы передачи установка синхронных компенсаторов и дросселей в середине линии (рис. 12) значительно повышает предел передаваемой мощности.

* Найдено выше при заземлении нейтрали дросселя через импидор.

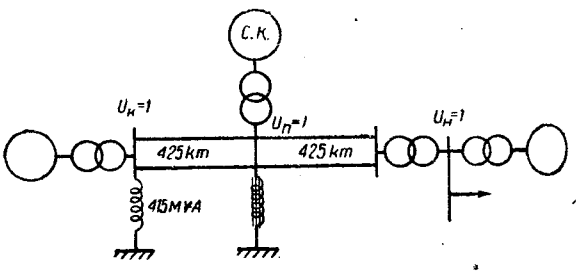


Рис. 12. *1* — шины бесконечной мощности, *2* — с учетом характеристик приемника

На рис. 13 дана зависимость предельной мощности от регулирующего эффекта промежуточных компенсаторов — синхронных компенсаторов и дросселей. В начале линии установлены ненасыщенные дроссели мощностью 415 MVA, создающие вместе с промежуточными компенсаторами при нормальном режиме те же условия работы генераторов (тот же коэфициент мощности), что и в схеме рис. 4

Генераторы и синхронные компенсаторы поддерживают при любой величине передаваемой мощности напряжения в начале и в середине линии неизменными. При этом мощность, отдаваемая компенсаторами, а следовательно, и их регулирующий эффект зависят от передаваемой по линии активной мощности. При данных характеристиках промежуточных компенсаторов предел передаваемой мощности определяется точкой пересечения кривой зависимости регулирующего эффекта от передаваемой в системе мощности и показанной на рис. 13 кривой, устанавливающей влияние регулирующего эффекта на величину предела мощности (рис. 14).

Если в середине линии установлены только синхронные компенсаторы мощностью 0,7 (70% от передаваемой в нормальном режиме активной мощности), то предел мощности получается очень небольшим — $P_{max} = 1{,}185$. При установке синхронных компенсаторов и ненасыщенных дросселей, имеющих одинаковую мощность 0,5, предел передаваемой мощности повышается до $P_{max} = 1{,}243$.

При насыщении же дросселей во втором варианте (регулирующий эффект дросселей — $4 \cdot 0{,}5 = 2{,}0$) предел мощности достигает уже весьма значительной цифры — $P_{max} = 1{,}382$. Чтобы получить тот же эффект с помощью одних лишь синхронных компенсаторов, мощность их должна быть доведена до 3,7, т. е. она должна почти вчетверо превышать нормальную величину передаваемой активной мощности.

Эти цифры в достаточной мере характеризуют эффективность промежуточных компенсаторов с насыщенными дросселями.

Следует отметить, что в варианте с насыщенными дросселями при предельном значении передаваемой в системе

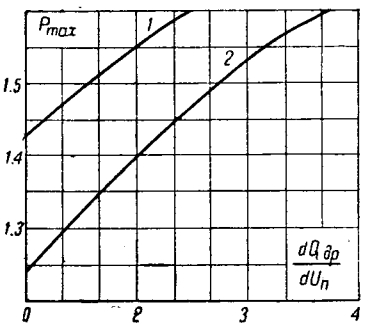


Рис. 13

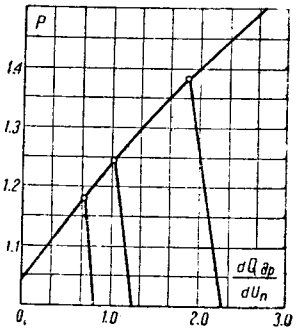


Рис. 14

мощности синхронный компенсатор развивает близкую к номинальной мощность.

Однако в сущности нет никаких оснований выбирать номинальную мощность компенсатора по этому режиму. Такой режим не может существовать сколько-нибудь длительный промежуток времени, хотя бы потому, что и турбины и генераторы не могут длительно развивать мощность порядка 130—140%. Запас статической устойчивости, определяемый предельной величиной передаваемой мощности, необходим лишь с точки зрения кратковременных набросов мощности и снижения напряжения приемника. При кратковременных же режимах задача удовлетворительно может быть решена форсировкой возбуждения компенсаторов.

Эти соображения в равной мере относятся и к генераторам, у которых в предельном режиме также может быть допущена форсировка возбуждения.

С этой точки зрения мощность синхронных компенсаторов в варианте с насыщенными дросселями могла бы быть выбрана значительно меньшей без всякого ущерба устойчивости, так как регулирующий эффект самих компенсаторов крайне невелик сравнительно с эффектом дросселей.

К систематике замкнутых якорных обмоток машин постоянного тока

В. А. Толвинский
Ленинград

О «последовательной обмотке n-го порядка» и «множественно-последовательной обмотке пониженной полюсности».

1. Введение. В большинстве современных книг по машинам постоянного тока изложение замкнутых якорных обмоток ведется применительно к барабанному якорю. Это мотивируется обычно соображениями, на первый взгляд весьма вескими: во-первых, кольцевой якорь применяется лишь в исключительных случаях; во-вторых, многие обмотки появились на свет в связи с барабанным якорем, и хотя их и можно применить к кольцевому якорю, но для него они не имеют никакого практического значения; в-третьих, в настоящее время из барабанных обмоток на практике применяют преимущественно симметричные обмотки, а это позволяет придать теории замкнутых обмоток барабанного якоря крайне сжатый и простой вид.

Все эти доводы, в том числе и последний, верны, но только формально. Внешняя простота, которую можно придать указанному способу изложения теории якорных обмоток, несомненно, очень облегчает изложение теории, но она таит в себе громадные трудности для приступающего к изучению обмоток, если он не хочет ограничиться одним запоминанием теории. По справедливому замечанию Zequenz [5] такое изложение неизбежно производит на приступающего к изучению обмоток впечатление произвола и случайности.

Учитывая это обстоятельство, кроме того, желая избежать изложения, хотя и более удобопонятного, но опирающегося на кольцевой, практически не применяемый тип якоря, Sequenz разработал новый способ изложения якорных обмоток [5], который исходит из звезды векторов э. д. с. секций обмотки и соответствующих ей потенциальных многоугольников.

Эта попытка представляет большой интерес, но такое изложение по нашему мнению хорошо лишь как обобщение уже изученных обмоток и в качестве такового оно безусловно займет подобающее место в теории вопроса. В качестве же исходного оно будет, несомненно, оставлять у изучающего такое же чувство неудовлетворенности, как и вышеотмеченное общепринятое изложение, так как влечет за собой отрыв от реальных обмоток, перенося весь вопрос в область изучения геометрических свойств звезды векторов

и потенциальных многоугольников; но хуже всего то, что такой отрыв от реальных обмоток может привести к ошибочным суждениям, что и случилось с самим Sequenz (см. ниже).

В поисках наиболее целесообразного способа изложения теории якорных обмоток автор уже давно (в 1919 г.) пришел к убеждению, что значительная часть трудностей исчезает, если в основу изложения положить кольцевой якорь и на нем изъяснить идею образования всех типов обмоток. Переход к обмоткам барабанных якорей можно осуществить тогда простым, наглядным приемом, в результате чего теория обмоток, равно как и вытекающая из нее классификация обмоток, приобретают надлежащую убедительность и стройность. За кольцевым якорем остается таким образом не только первое место в истории обмоток, но и в их теории. Указанный способ изложения обмоток требует, конечно, значительно большего времени на лекциях и места в книге, но, как показал опыт автора и ряда лиц, последовавших его примеру, этот труд приносит всегда желательные результаты.

Автор с удовлетворением может отметить, что в подходе к изложению теории якорных обмоток машин постоянного тока на такой же точке зрения стоит Mauduit [8]. Но Mauduit, к сожалению, не проводит ее до конца, в результате чего в вопросе о наименовании кольцевой обмотки «правой» или «левой» он остался на позиции Arnold, неправильность которой была указана автором в заметке, напечатанной в 1925 г. [2]. При последовательном проведении предлагаемого автором способа изложения обмоток выявляется не только неприемлемость определения Arnold правой и левой кольцевой обмотки, но и ряд особенностей отдельных типов обмоток, которые используются зачастую в рисунках схем этих обмоток без всяких пояснений, что у читателя неизбежно вызывает неразрешимые недоумения. На эти особенности автор обратил вниманче в заметке, напечатанной в 1930 г. [4].

Свое изложение замкнутых якорных обмоток машин постоянного тока автор дал в книге по машинам постоянного тока, вышедшей первым (литографированным) изданием в 1925 г. и вторым (печатным) в 1929 г. [3]. Через пять лет после выхода 2-го издания этой книги—в 1934 г.—Sequenz опубликовал статью о новой обмотке, названной им «последовательной обмоткой *n*-го порядка» [7]. Настоящая статья имеет целью, во-первых, показать, что предложенная Sequenz обмотка наглядно и органически увязывается с прочими, ранее известными обмотками, во-вторых, исправить ошибки, допущенные Sequenz при изложении свойств ее, и, в-третьих, указать на возможность осуществить новый тип множественно-последовательной обмотки, обладающей свойствами, которых нет у применяемых ныне множественно-последовательных обмоток. Новую обмотку автор предлагает назвать множественно-последовательной обмоткой пониженной полюсности.

Исходные положения[1]. Основной тип якоря. Основным типом якоря коммутаторной[2] машины постоянного тока, на котором с наибольшей наглядностью выявляются все возможности образования замкнутой обмотки, является гладкий кольцевой.

Требования, которым должна удовлетворять замкнутая обмотка гладкого кольцевого якоря. Первое основное требование заключается в самом названии: обмотка должна быть замкнутой. Далее обмотка должна включать все равномерно расположенные на окружности якоря секции и обладать при всех положениях якоря, вращающегося вместе с коммутатором относительно неподвижных щеток, одними и теми же свойствами. Очевидно, что рациональным может быть признано лишь такое выполнение замкнутой обмотки якоря, при котором э. д. с. отдельных ее секций не противодействуют друг другу; при наличии же на кольцевом якоре секций двоякого рода—северных и южных[3]—это приводит к требованию, чтобы щетками, стоящими на коммутаторе, обмотка якоря разбивалась на отдельные параллельные относительно щеток ветви, включающие каждая лишь секции одной и той же полярности. Отсюда следует, во-первых, что число параллельных ветвей, на которые щетки разбивают обмотку, не может быть меньше двух, а, во-вторых, что устройство замкнутой якорной обмотки должно быть таково, чтобы при каждом изменении направления индуктируемой в секции э. д. с. происходило переключение секции из ветви одной полярности в ветвь противоположной полярности.

Первообразные, или простые, и производные, или множественные, обмотки гладкого кольцевого якоря. Основных, или первообразных, принципиально различных по способу образования замкнутых обмоток, которые можно осуществить на гладком кольцевом якоре многополюсной машины ($2p > 2$), — две: в одной из них, называемой простой параллельной обмоткой, число пар параллельных ветвей равно числу пар полюсов ($a = p$), в другой, называемой простой последовательной обмоткой, число пар параллельных ветвей равно единице ($a = 1$).

Все прочие замкнутые обмотки гладкого кольцевого якоря являются производными от указанных простых, или первообразных. Назначение производных обмоток — увеличить (умножить) число параллельных ветвей по сравнению с числом их в исходной первообразной обмотке, поэтому производные обмотки можно назвать множественными, а коэфициент увеличения (умножения) числа параллельных ветвей по сравнению с числом их в исходной первообразной простой обмотке—коэфициентом множественности; обозначим его через m.

Схема обмотки якоря. Рисунок, на котором в схематическом виде дается соединение друг с другом активных проводников обмотки якоря, называется схемой обмотки якоря.

---

[1] Используемые в статье термины и условные обозначения мы полагаем известными [3].

[2] Обычно пользуются термином «коллекторная машина постоянного тока», что неправильно, так как коллектор является понятием, объединяющим собой и коммутатор и контактные кольца.

[3] Т. е. лежащих под северными и лежащих под южными полюсами.

Схему обмотки изображают двояким образом: либо на поперечном схематическом виде машины, либо мысля якорь разрезанным по образующей его боковой цилиндрической поверхности и развернутым в плоскость.

Схему, представленную на поперечном виде машины, будем называть торцевой схемой (обмотка якоря проектируется на торец машины), а схему, представленную на боковой поверхности якоря, развернутой в плоскость, назовем боковой схемой, или схемой-разверткой. Схема-развертка нашла широкое применение при изображении обмоток барабанного якоря; при рассмотрении обмоток кольцевого якоря пользуются торцевыми схемами.

Нумерацию проводников и коммутаторных пластин на торцевых схемах принимаем по часовой стрелке. В схемах обмоток кольцевого якоря число активных проводников s (проводников, расположенных на наружной поверхности якоря) равно числу коммутаторных пластин K; коммутатор мыслится на переднем плане рисунка, причем начала активных проводников (т. е. их торцы, обращенные к коммутатору) соединяются с коммутаторными пластинами, имеющими те же порядковые номера. При этом угловое расположение коммутаторных пластин относительно активных проводников, имеющих те же номера, выбирают обычно так, чтобы передние и задние лобовые соединения получали на схеме, по возможности, одинаковую длину.

Составление торцевой схемы замкнутой обмотки гладкого кольцевого якоря. Из предыдущего следует, что, приступая к составлению торцевой схемы замкнутой обмотки гладкого кольцевого якоря, нужно прежде всего перенумеровать активные проводники и коммутаторные пластины и соединить начала активных проводников с пластинами, имеющими те же номера. Тогда составление схемы сведется к осуществлению на рисунке соединения конца каждого из активных проводников с началом того активного проводника (или, что то же, с соответствующей ему коммутаторной пластиной), который должен следовать за ним по идее осуществляемого типа обмотки.

Разновидности простой последовательной обмотки гладкого кольцевого якоря. Простая последовательная обмотка позволяет получить в случае многополюсной машины только две параллельные ветви. Для образования такой обмотки на гладком кольцевом якоре нужно, взяв какой-нибудь активный проводник, например, лежащий под одним из северных полюсов, соединить его конец с началом смежного активного проводника не непосредственно, как это делается при осуществлении простой параллельной обмотки, а захватив предварительно по одному активному проводнику под каждым из всех прочих одноименных полюсов. При этом захватываемые проводники должны лежать в магнитных условиях, возможно близких к тем, в которых находится исходный проводник. Кроме того, для выполнения основного требования, которому должна удовлетворять замкнутая обмотка, нужно, чтобы при захвате по одному проводнику под каждым из одноименных полюсов мы проходили по окружности якоря (или, что то же, по окружности коммутатора) каждый раз одну и ту же дугу, т. е. делали каждый раз один и тот же шаг. Из этого следует, что для осуществления на гладком кольцевом якоре простой последовательной обмотки необходимо, чтобы между числом активных проводников на якоре s, числом пар полюсов p и шагом обмотки по якорю y, выраженным числом делений якоря, существовала определенная зависимость.

Так как прежде чем перейти от исходного проводника к смежному, скажем справа, мы совершаем согласно вышесказанному p шагов, каждый равный y делениям якоря, а всего проходим таким образом $s+1$ деление якоря, то связь между y, p и s можно представить формулой:

$$yp = s + 1, \tag{1}$$

отсюда

$$y = \frac{s+1}{p}.$$

Принцип образования на гладком кольцевом якоре простой последовательной обмотки в той формулировке, которую мы привели выше, оставляет свободу в трех направлениях:

во-первых, в выборе направления сдвига в магнитном поле;

во-вторых, в выборе направления обхода по якорю;

в-третьих, в выборе способа обхода по якорю.

В самом деле, захватывая под каждым из одноименных полюсов по одному проводнику и делая, таким образом, каждый раз шаг y, можно выбрать этот шаг таким, чтобы по возвращении под исходный полюс присоединиться к проводнику, смежному с начальным и лежащим от него справа, как это мы полагали, составляя формулу (1), но можно, очевидно, взять такой шаг y, чтобы по возвращении под исходный полюс присоединиться к проводнику, смежному с начальным, но лежащему от него слева. В этом случае вместо формулы (1) мы должны написать:

$$yp = s - 1, \tag{2}$$

откуда

$$y = \frac{s-1}{p}.$$

Обе формулы (1) и (2) можно объединить, написав:

$$yp = s \pm 1$$

или

$$y = \frac{s \pm 1}{p}. \tag{3}$$

Обмотку, которой в формуле (3) соответствует в числителе правой части знак плюс, будем называть правой простой последовательной обмоткой, а обмотку, которой соответствует знак минус,—левой простой последовательной обмоткой. В первой, совершая при переходе по торцевой схеме обмотки от одного проводника к другому шаг y, мы каждый раз сдвигаемся в магнитном поле вправо, чем и определяется наименование обмотки (рис. 1,*а*

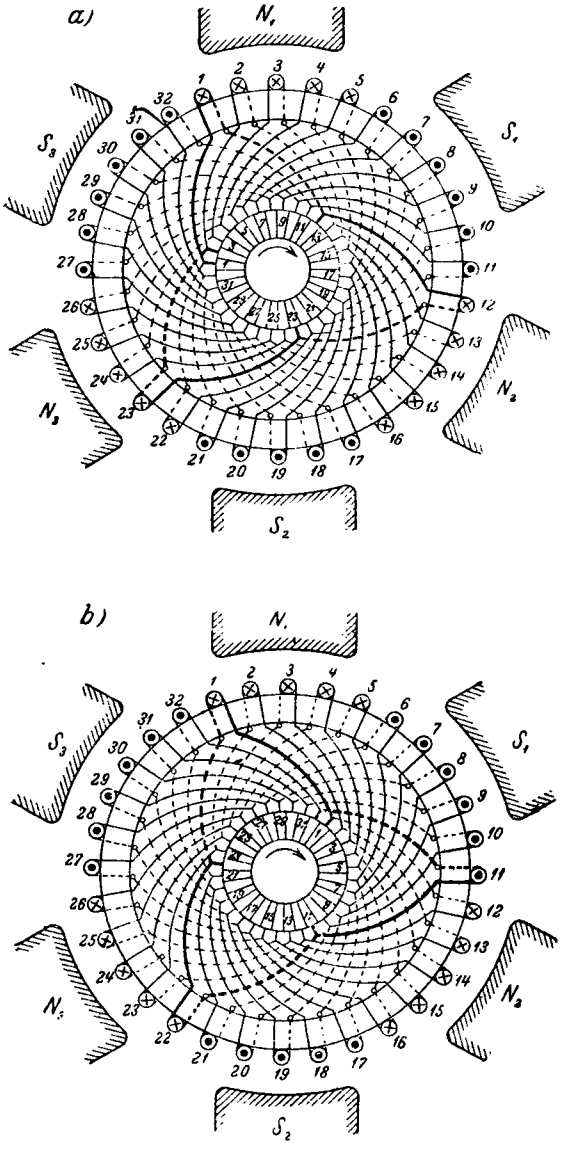


Рис. 1. Регулярная простая последовательная обмотка: $K=32$, $p=3$; *a*—правая, с правым обходом, $y_к=+11$; *b*—левая, с левым обходом, $y_к=-11$

и 2,*b*), во второй имеем сдвиг влево (рис. 1, *b* и 2,*a*).

Так как в кольцевом якоре число активных проводников s (число индуктируемых сторон обмотки) равно числу коммутаторных пластин K, то шаг обмотки по якорю y равен в этом типе якоря шагу по коммутатору $y_к$, измеренному числом коммутаторных делений, который можно представить так:

$$y_к=\frac{K\pm 1}{p}. \qquad (4)$$

Далее при одном и том же шаге $y=y_к$ при образовании простой последовательной обмотки кольцевого якоря можно производить захват по одному активному проводнику под каждым одноименным полюсом, делая обход одноименных полюсов по часовой стрелке, — правый обход, либо против часовой стрелки — левый обход, при этом как обмотка с правым, так и обмотка с левым обходом может быть с точки зрения сдвига в магнитном поле либо правой либо левой (рис. 1 и 2).

Чтобы охватить обе эти возможности, формулу (4) следует писать так:

$$y_к=\frac{\pm K\pm 1}{p}; \qquad (5)$$

здесь знак плюс перед K относится к правому, а знак минус — к левому обходу по якорю.

Наконец, при одном и том же направлении сдвига в магнитном поле и одном и том же направлении обхода по якорю можно произвести захват по одному активному проводнику под всеми одноименными полюсами, делая это в порядке встречаемых при обходе одноименных полюсов, как это мыслилось выше, либо скачкообразно, а именно: пропуская каждый раз один одноименный полюс либо два одноименных полюса и т. д., т. е. идя через два, три и т. д. двухполюсных деления. При скачкообразном обходе, для того чтобы прежде чем присоединиться к проводнику, смежному с начальным, захватить по одному проводнику под всеми одноименными

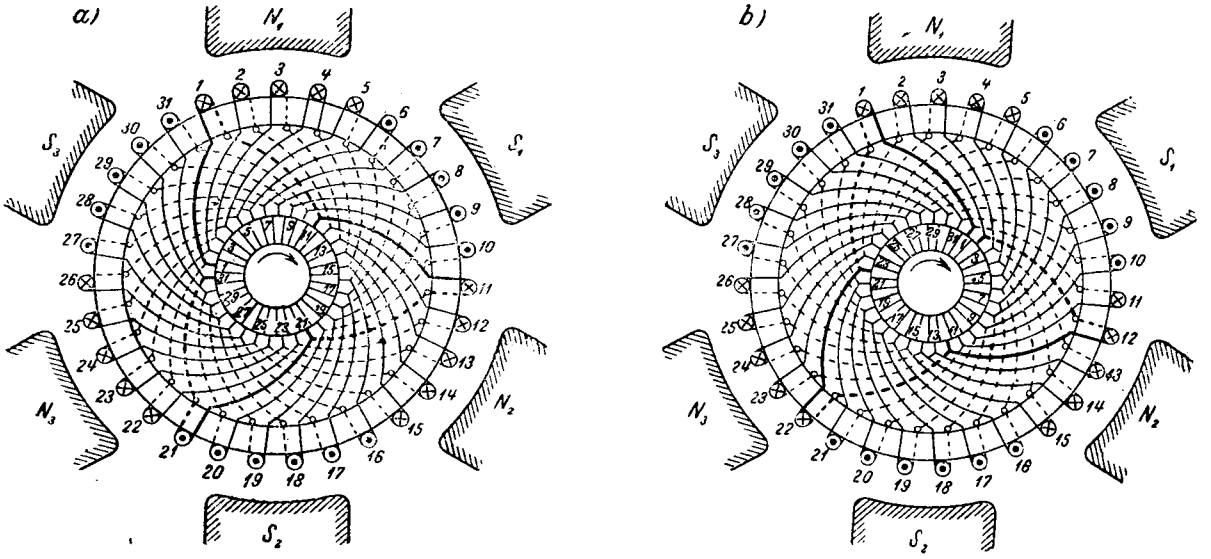


Рис. 2. Регулярная простая последовательная обмотка: $K=31$, $p=3$; *a*—левая, с правым обходом, $y_к=+10$; *b*—правая, с левым обходом, $y_к=-10$

полюсами, нужно совершить столько полных обходов по якорю, сколько двойных полюсных делений g мы проходим при каждом шаге $y_к$. Вследствие этого формулу (5) нужно в этом случае писать так:

$$y_к p = \pm Kg \pm 1,$$

откуда

$$y_к = \frac{\pm Kg \pm 1}{p}. \qquad (6)$$

Как нетрудно убедиться, эта формула годится и для нормального обхода по якорю, т. е. без скачков, если в ней положить $g=1$. Таким образом формулой (6) можно пользоваться как обобщенной формулой для шага простой последовательной обмотки.

При $g=1$ простую последовательную обмотку будем называть регулярной, при $g>1$ — скачкообразной, или галопирующей. Для иллюстрации на рис. 3 дана галопирующая правая последовательная обмотка с правым обходом.

Галопирующая простая последовательная обмотка представляет собой предложенную Sequenz простую последовательную обмотку n-го порядка [7].

Условия осуществления на гладком кольцевом якоре галопирующей простой последовательной обмотки[4]. Первое условие состоит в том, что числа g и p должны быть взаимно простые. Действительно, предположим, что они имеют общий наибольший делитель d, и обозначим:

$$\frac{g}{d} = g'; \quad \frac{p}{d} = p'.$$

Тогда

$$y_к = \frac{\pm Kg \pm 1}{p} = \frac{\pm Kg' \pm \frac{1}{d}}{p'}.$$

Как видим, y_k получается дробным числом, что недопустимо, а следовательно, числа g и p не могут иметь общего наибольшего делителя $d>1$, т. е. должны быть взаимно простые.

Второе условие состоит в том, что g должно быть меньше p. В самом деле, предположим, что

$$g = p + b,$$

где b — целое число.

Тогда, подставив это выражение в формулу (6), получим:

$$y_к = \frac{\pm Kg \pm 1}{p} = \frac{\pm K(p+b) \pm 1}{p} = \pm K + \frac{\pm Kb \pm 1}{p}.$$

Первый член в последней части, т. е. $\pm K$, играет такую же роль, как период $\pm 2\pi$ в аргументе тригонометрической величины. Действительно, выйдя из какой-нибудь пластины коммутатора и пройдя K пластин, мы возвращаемся к той же пластине; поэтому при $g = p + b$ шаг обмотки $y_к$ получается таким же, как и при $g = b$, чем доказывается необходимость выполнения второго условия, т. е. что g должно быть меньше p.

На основании этого условия можно написать:

$$p = g + \gamma$$

или

$$g = p - \gamma.$$

[4] Этот вопрос в статье Sequenz [7] остался непроанализированным, в результате чего Sequenz пришел к неверным выводам, см. дальше.

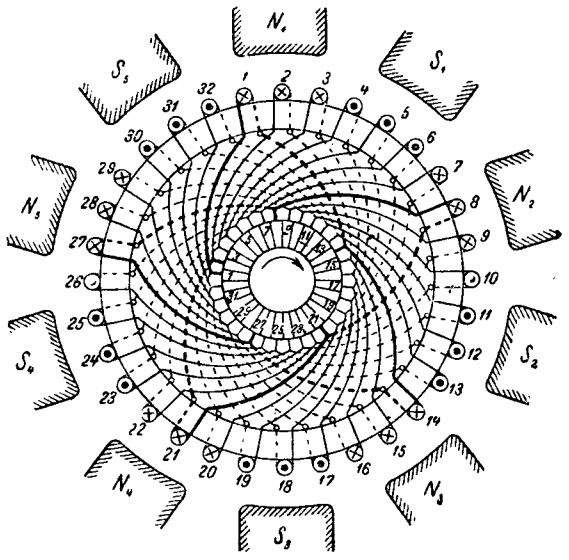


Рис. 3. Галопирующая правая простая последовательная обмотка с правым обходом:

$K = 32,\ p = 5,\ g = 2,\ y_к = +13$

Здесь следует отметить, что g не может равняться γ, так как тогда имело бы место равенство $g = \frac{p}{2}$, т. е. у p и g был бы общий делитель g, а это, как было доказано выше, недопустимо. Таким образом должно существовать соотношение:

$$g > \gamma \text{ либо } g < \gamma,$$

иначе говоря, либо

$$g > \frac{p}{2}, \text{ а тогда } \gamma < \frac{p}{2},$$

либо

$$g < \frac{p}{2}, \text{ а тогда } \gamma > \frac{p}{2}.$$

Например, при $p=5$ можем иметь либо $g=3$, $\gamma=2$ либо $g=2$, а $\gamma=3$.

Докажем, что, хотя g может быть либо больше, либо меньше $\frac{p}{2}$, но практически следует всегда брать $g < \frac{p}{2}$. Предполагая $g < \frac{p}{2}$, подставим $g = p - \gamma$ в выражение (6):

$$y_к = \frac{\pm Kg \pm 1}{p} = \frac{\pm K(p-\gamma) \pm 1}{p} = \pm K + \frac{\mp K\gamma \pm 1}{p}.$$

Здесь опять первый член в правой части, т. е. $\pm K$, играет роль $\pm 2\pi$ в аргументе тригонометрической величины, а поэтому можно написать:

$$y_к = \frac{\pm Kg \pm 1}{p} = \frac{\mp K\gamma \pm 1}{p}. \qquad (7)$$

Это значит, что обмотка с правым обходом и скачком g тождественна обмотке с левым обходом и скачком $\gamma = p - g$ и, наоборот, обмотка с левым обходом и скачком g тождественна обмотке с правым обходом и скачком $\gamma = p - g$.

Тождественность обмоток понимается в смысле их свойств по отношению к коммутатору, но так как было взято $g < \frac{p}{2}$, а следовательно, $\gamma > \frac{p}{2}$, то преимущество будет за обмоткой со скачком g,

так как в ней длина лобовых соединений будет короче, чем в обмотке со скачком γ.

Таким образом скачок g следует брать меньше $\frac{p}{2}$.

Резюмируя, можем установить следующие условия, выполнение которых необходимо для получения по формуле (6) галопирующей простой последовательной обмотки:

1) g — целое число, взаимно простое с p;

2) $2 \leqslant g < \frac{p}{2}$.

Очевидно, при

$$p=2, \quad p=3 \quad \text{и} \quad p=4$$

галопирующая обмотка невозможна.

При $p=5$ возможно лишь одно значение: $g=2$. При $p=6$ галопирующая обмотка невозможна; при $p=7$ можем иметь $g=3$ и $g=2$; при $p=8$ возможно одно значение $g=3$; при $p=9$ возможны два значения: $g=1$ и $g=2$ и т. д.

В галопирующей обмотке получается увеличенная затрата меди на лобовые соединения проводников, что является ее несомненным недостатком; этим объясняется, почему такая обмотка не использовалась до сих пор. Заслуга Sequenz состоит в том, что он обратил внимание на ту возможность, которую эта обмотка представляет при некоторых соотношениях K и p. Суть дела заключается в том, что шаг y_k должен быть целым числом, а потому при данном p выбор K ограничивается значениями, дающими по формуле (5) для y_k целые числа. При применении для y_k формулы (6) число возможных значений K при данном p возрастает.

В самом деле, предположим, что $p=5$ и что требуется осуществить простую последовательную обмотку с числом коммутаторных пластин $K=33$. Обыкновенная, регулярная простая последовательная обмотка в этом случае невозможна, так как по формуле (5)

$$v_k = \frac{\pm K \pm 1}{p} = \frac{\pm 33 \pm 1}{5} \neq \text{ц. ч.}$$

По формуле же (6), взяв в числителе перед первым членом плюс, перед вторым минус и положив $g=2$, находим:

$$y_k = \frac{Kg-1}{p} = \frac{33 \cdot 2 - 1}{5} = 13.$$

Получается галопирующая левая последовательная обмотка с правым обходом. Мы могли бы, очевидно, осуществить и галопирующую правую последовательную обмотку с левым обходом при том же значении $g=2$:

$$v_k = \frac{-Kg+1}{p} = \frac{-33 \cdot 2 + 1}{5} = -13.$$

Сопоставление двух только что приведенных обмоток показывает, что наличие в числителе правой части формулы (6)

$$v_k = \frac{\pm Kg \pm 1}{p}$$

двойных знаков перед обоими членами излишне. Действительно, при заданных K, g и p шаг y_k может получиться целым числом (что необходимо) лишь при одной из двух возможных комбинаций знаков, а именно: либо в случае, когда эти знаки одинаковы, либо когда они противоположны. Из этого следует, что практически можно остановиться на любом из двух возможных направлений обхода по обмотке. Выбирая правое, можно придать формуле (6) упрощенный вид:

$$v_k = \frac{Kg \pm 1}{p}. \qquad (6a)$$

Число щеток при простой последовательной обмотке. Выше указывалось, что в рационально устроенной замкнутой обмотке кольцевого якоря проводник при переходе через нейтральную зону должен перебрасываться в ветвь противоположной полярности соответственно происшедшему изменению направления индуктируемой в нем э.д.с.

В параллельной обмотке кольцевого якоря переброс проводника из одной ветви в другую происходит естественным и наглядным образом в каждой нейтральной зоне щеткой, которая стоит в этой зоне. В простой последовательной обмотке требуются всего 2 щетки по числу параллельных ветвей, но необходимое переключение проводника из одной ветви в другую совершается здесь также нужное число раз; это происходит благодаря тому, что в момент касания каждой из щеток двух смежных коммутаторных пластин замыкается накоротко столько последовательно соединенных проводников, проходящих через нейтральные зоны, сколько в машине одноименных полюсов, т. е. сколько пар полюсов. Так, в шестиполюсной машине ($p=3$), снабженной простой последовательной обмоткой, каждая щетка при касании двух смежных коммутаторных пластин замыкает накоротко $p=3$ последовательно соединенных проводника, лежащих в трех одноименных нейтральных зонах.

Нетрудно убедиться, что как положительная, так и отрицательная щетка может стоять в любой из p одноименных нейтральных (коммутационных) зон.

Необходимость иметь в машине с простой последовательной обмоткой всего 2 щетки не мешает установке полного возможного числа щеток, т. е. по числу нейтральных (коммутационных) зон. Соединяя все положительные и соответственно все отрицательные щетки, получаем два внешних зажима машины.

При применении полного числа щеток число переключений каждого проводника обмотки из одной ветви в другую совершается так же, как и при наличии только двух щеток нужное число раз ($2p$), но теперь при прохождении через короткое замыкание коммутируемые проводники находятся не только в последовательном, но и в параллельном соединении. Это обстоятельство является причиной того, что при применении в простой последовательной обмотке полного числа щеток ток машины распределяется между щетками одной и той же полярности неравномерно, а в зависимости от падений напряжений под отдельными щетками, что в свою очередь зависит от состояния контактов щеток.

Множественная последовательная обмотка гладкого кольцевого якоря. Накладывая на гладкий кольцевой якорь, снабженный простой последовательной обмоткой, такую же обмотку, притом таким образом, чтобы проводники и коммутаторные пластины накладываемой обмотки равномерно расположились соответственно между проводниками и пластинами первоначальной, и применяя щетки шириной, большей ширины одного коммутаторного деления, можем увеличить число параллельных ветвей машины вдвое.

Совокупность двух совмещенных на якоре указанным способом простых последовательных обмоток носит название множественно-последовательной обмотки; коэфициент m, указывающий увеличение числа параллельных ветвей по сравнению с числом параллельных ветвей в каждой из наложенных обмоток, назовем коэфициентом множественности. В рассмотренном случае $m=2$. Обозначая число пар параллельных ветвей множественной обмотки через a и учитывая, что в простой последовательной обмотке $a=1$, можем написать в данном случае, что $m=a$.

Рассмотренная множественно-последовательная обмотка распадается на две независимые цепи, а потому ее можно назвать двукратнозамкнутой, а так как независимые цепи представляют собой простые последовательные обмотки, то данную обмотку можно назвать двукратнопростой.

Если на якоре совместить указанным способом не две, а z идентичных простых последовательных обмоток, то совокупность их будет представлять множественно-последовательную z раз замкнутую обмотку; очевидно, что в этом случае $z=m=a$.

Обозначим число коммутаторных пластин каждой из z наложенных простых последовательных обмоток через K', число пар параллельных ветвей (равно 1) через a', шаг через $y_к'$. Тогда в множественно-исследовательной обмотке, составленной из z простых, число коммутаторных пластин K, число пар параллельных ветвей a и шаг $y_к$ будут в z раз больше, чем в каждой из совмещенных обмоток;

$$K=K'z; \qquad a=a'z; \qquad y_к=y_к'z.$$

Формула для шага $y_к$ примет такой вид:

$$y_к=\frac{Kg\pm a}{p}=\frac{K'zg\pm a'z}{p}=y'_кz. \qquad (8)$$

Отсюда следует, что признаком[5], свидетельствующим о том, что множественно-последовательная обмотка является z раз замкнутой, служит наличие у K, a и $y_к$ общего наибольшего делителя $z>1$.

Если в формуле (8) числа K, a и $y_к$ не будут иметь общего делителя $z>1$, но $a>1$, то получаемая по формуле (8) обмотка будет попрежнему множественно-последовательной с коэфициентом множественности $m=a$, но она будет замыкаться только после обхода всех проводников, а поэтому ее следует называть однократнозамкнутой, или однократной; у нее $z=1$, в то время как $m=a>1$.

[5] В статье Sequenz [7] по этому вопросу приведены ошибочные сведения.

Можно, наконец, мыслить себе совмещение на одном якоре z однократнозамкнутых множественно-последовательных обмоток каждая с коэфициентом множественности $m'=a'>1$ и коэфициентом кратности $z'=1$. Составленная таким образом обмотка будет множественно-последовательной с коэфициентом множественности $m=m'z$, числом пар параллельных ветвей $a=a'z$ и коэфициентом кратности z, лежащим в пределах $1<z<m$. Полученную множественно-последовательную обмотку можно назвать многократно-однократной.

Все вышеприведенные рассуждения относятся в одинаковой степени как к регулярным, так и галопирующим обмоткам, так как при рассуждениях мы пользовались обобщенной формулой (8) для шага обмотки, охватывающей оба эти типа обмоток.

Число щеток при множественной последовательной обмотке. Из изложенного выше принципа образования множественной последовательной многократнопростой обмотки, т. е. обмотки, распадающейся на несколько простых последовательных обмоток, явствует, что число необходимых щеток остается в этом случае тем же, что и в простой последовательной обмотке, т. е. требуются принципиально всего две щетки, но ширина каждой щетки должна быть такова, чтобы щетки все время имели электрическую связь со всеми наложенными на якорь независимыми обмотками. Практически, как то указывает Richter [1], ширина щетки в множественно-последовательной обмотке должна быть не менее $K+1$ коммутаторных делений. Минимальное число щеток и их необходимая ширина не изменяются и в случаях, когда множественная последовательная обмотка однократная или многократно-однократная.

Условие, при котором множественная последовательная обмотка получается галопирующей. Из способа получения многократной множественной последовательной обмотки из простых последовательных обмоток явствует, что если $g>1$, т. е. если накладываемые на якорь простые последовательные обмотки галопирующие, то и составленная из них многократно-простая множественно-последовательная обмотка будет галопирующей, причем для нее остается в силе условие, выведенное для простой последовательной галопирующей обмотки — отсутствие у g и p общего делителя. Это условие сохраняет силу и в случаях однократной и многократно-однократной множественно-последовательной галопирующей обмотки, иначе говоря, оно является общим для всех галопирующих обмоток как простой, так и множественных.

Это можно доказать следующим образом.

Предположим, что g и p имеют общий наибольший делитель d:

$$\frac{g}{d}=g'; \qquad \frac{p}{d}=p'.$$

Тогда формулу (8) можно переписать так:

$$y_к=\frac{Kg\pm a}{p}=\frac{Kg'\pm\frac{a}{d}}{p'}.$$

Отсюда видим, что $y_к$ только тогда получится целым числом, если $\frac{a}{d}$ = ц. ч.; обозначим:

$$\frac{a}{d} = a'.$$

Формулу (8) можно представить теперь в таком виде:

$$y_к = \frac{Kg' \pm a'}{p'}, \qquad (9)$$

где g', a' и p' — числа взаимно простые.

Всматриваясь в эту формулу, видим, что собственно шаг $y_к$, определенный по ней, является шагом по коммутатору не данной машины, а машины с тем же числом коммутаторных пластин K, но с уменьшенным числом пар полюсов $p' = \frac{p}{d}$, — пониженная полюсность, при этом обмотка будет и на соответственно пониженное число пар параллельных ветвей $a' = \frac{a}{d}$, — пониженная разветвленность.

Если общий наибольший делитель чисел g, a и p равен g, т. е. если $d = g$, то $g' = 1$, а тогда формула (9) принимает такой вид:

$$y_к = \frac{K \pm a'}{p'}.$$

Это значит, что в этом частном случае обмотка пониженной полюсности и пониженной разветвленности будет не галопирующей, а регулярной.

Ошибка, допущенная Sequenz. Условия, которому должна удовлетворять галопирующая множественно-последовательная обмотка, Sequenz недосмотрел в своей статье, посвященной галопирующей обмотке [12]. Причиной недосмотра явилось то, что, когда речь идет о галопирующей простой последовательной обмотке, условие, требующее, чтобы g и p были числа взаимно простые, приходится выполнять обязательно, так как иначе $y_к$ не получится целым числом, на что мы указали выше. При пользовании же для множественно-последовательной галопирующей обмотки формулой (8) может оказаться, что не только g и p, но и g, p и a имеют общий наибольший делитель d, а тогда формула дает для $y_к$ целое число, несмотря на нарушение условия осуществления галопирующей обмотки (g и p — числа взаимно простые).

В своей статье Sequenz [12] рассматривает задачу — осуществить последовательную обмотку для следующих данных:

$$K = 66; \quad p = 8; \quad a = 4.$$

По формуле (5) регулярная последовательная обмотка невозможна, так как

$$y_к = \frac{K \pm a}{p} = \frac{66 \pm 4}{8} \neq \text{ц. ч.}$$

По этой причине Sequenz пробует осуществить галопирующую обмотку по формуле (8); приняв $g = 2$, он получает

$$y_к = \frac{Kg - a}{p} = \frac{66 \cdot 2 - 4}{8} = 16 \qquad (10)$$

и считает задачу решенной. В действительности, как нетрудно убедиться, при $g = 2$ у параметров g, p и a имеется общий делитель $d = g = 2$, вследствие чего формула для $y_к$ принимает такой вид:

$$y_к = \frac{K - a'}{p'} = \frac{66 - 2}{4} = 16, \qquad (10a)$$

где

$$p' = \frac{p}{2} = 4; \qquad a' = \frac{a}{2} = 2.$$

А это формула для осуществления регулярной множественно-последовательной обмотки со следующими данными:

$$K = 66; \quad p = 4; \quad a = 2.$$

Иначе говоря, получаем обмотку, выполненную на 2 раза меньшее число пар полюсов и на 2 раза меньшее число пар параллельных ветвей; при этом обмотка получается двукратнозамкнутой, так как числа $y_к = 16$; $K = 66$ и $a = 2$ имеют общий наибольший делитель $z = 2$.

Как уже отмечалось выше, подобную двукратнозамкнутую обмотку можно мыслить как результат наложения на якорь двух независимых, совершенно тождественных обмоток, имеющих:

$$K' = \frac{K}{z} = \frac{66}{2} = 33;$$

$$a' = \frac{a}{z} = \frac{2}{2} = 1;$$

$$p = 4;$$

$$y'_к = \frac{K' - a'}{p} = \frac{33 - 1}{4} = 8. \qquad (11)$$

Очевидно, что свойства рассматриваемой Sequenz обмотки (10) всецело определяются свойствами каждой из указанных независимых тождественных обмоток (11), а эти обмотки являются регулярными левыми простыми последовательными обмотками с правым обходом, выполненными для машины с $p = 4$ (рис. 4).

Если, следуя Sequenz, считать, что обмотка, осуществленная по формуле (10), является галопирующей обмоткой машины, имеющей число

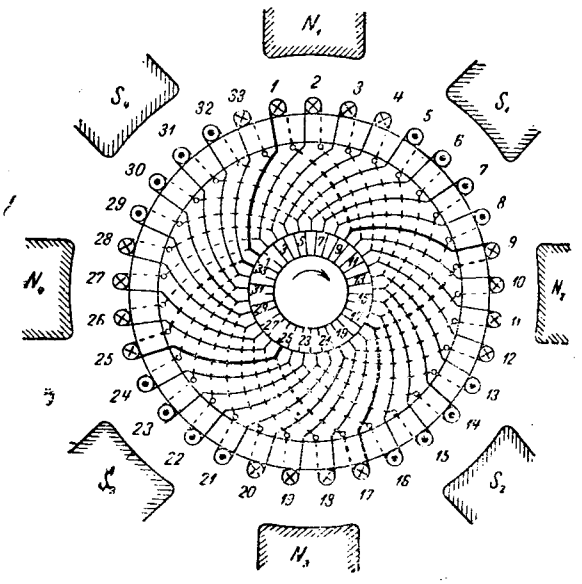


Рис. 4. Регулярная левая простая последовательная обмотка с правым обходом:
$K = 33$, $p = 4$, $y_к = +8$

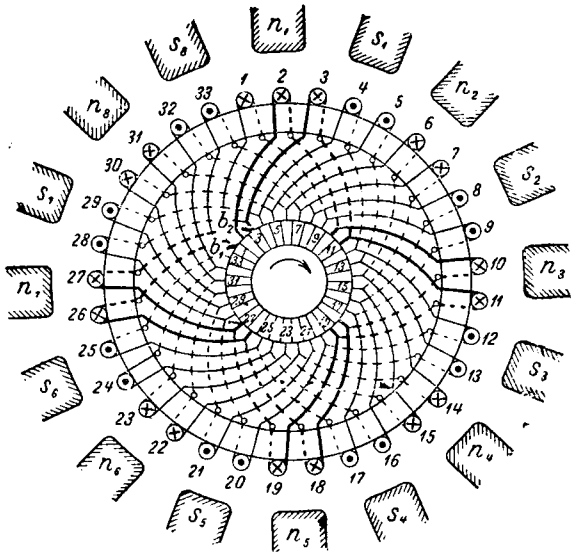


Рис. 5. Иллюстрация к образованию множественно-последовательной обмотки пониженной полюсности

пар полюсов $p=8$ (рис. 5), то тогда мы вправе требовать, чтобы эта обмотка как последовательная допускала установку на коммутаторе всего двух щеток: одной положительной (b_1) и одной отрицательной (b_2).

Поставив эти щетки в двух смежных коммутационных зонах — на коммутаторных пластинах проводников *1* и *3*, начнем обход обмотки, идя от щетки b_2 к проводнику *3* и дальше. Нетрудно убедиться при этом, что к щетке b_1 мы приходим, захватив нижеследующие проводники, лежащие в сфере действия всех северных полюсов с нечетными номерами:

$$\left.\begin{array}{cccc} n_1, & n_3, & n_5 & n_7 \\ 3 & 11 & 19 & 27 \\ 2 & 10 & 18 & 26 \end{array}\right\} \qquad (a)$$

Следуя по обмотке дальше, проходим по проводнику *1*, а затем по проводникам, находящимся под всеми южными полюсами с четными номерами:

$$\left.\begin{array}{cccc} s_2 & s_4 & s_6 & s_8 \\ 9 & 17 & 25 & 33 \\ 8 & 16 & 24 & 32 \end{array}\right\} \qquad (b)$$

Продолжая обход, проходим по проводникам, лежащим в сфере всех северных полюсов с четными номерами:

$$\left.\begin{array}{cccc} n_2 & n_4 & n_6 & n_8 \\ 7 & 15 & 23 & 31 \\ 6 & 14 & 22 & 30 \end{array}\right\} \qquad (c)$$

а затем по проводникам, лежащим под всеми южными полюсами с нечетными номерами:

$$\left.\begin{array}{cccc} s_1 & s_3 & s_5 & s_7 \\ 5 & 13 & 21 & 29 \\ 4 & 12 & 20 & 28 \end{array}\right\} \qquad (d)$$

От проводника *28* попадаем к щетке b_2, стоящей на коммутаторной пластине проводника *3*, с которого был начат обход обмотки. Последняя, таким образом, замыкается.

Не обращая пока внимания на проводник *1*, можно сказать, что щетками b_1 и b_2 обмотка (рис. 5) разбивается на две параллельные ветви. В одной из них имеется одна четверть всех проводников якоря (8 проводников с номерами *3, 11, 19, 27, 2, 10, 18, 26* — группа *a*), в другой — остальные три четверти проводников ($8\times 3=24$ проводника, не считая *1* — группы *b*, *c* и *d*). Назовем эти ветви соответственно малой и большой параллельной ветвью обмотки. Из обхода обмотки выявляется, кроме того, еще одно существенное обстоятельство, а именно: во всех проводниках малой параллельной ветви индуктируются э. д. с. одной и той же полярности (северной — группа *a*), в большой же ветви имеются проводники с взаимно обратными направлениями индуктируемых э. д. с., причем в одной трети проводников этой ветви (группа *c*) направление э. д. с. то же, что и в проводниках малой ветви, а в двух третях проводников этой ветви (группы *b* и *d*) направление э. д. с. обратное. В результате этого три четверти проводников якоря, составляющих большую параллельную ветвь, будут давать ту же по величине э. д. с., что и одна четверть проводников, составляющих малую параллельную ветвь обмотки. Очевидно, что такая обмотка не удовлетворяет основному требованию, предъявляемому к замкнутым обмоткам (см. выше).

Выше мы оставили без внимания проводник *1*, входящий в большую ветвь. Совершенно очевидно, что учет этого проводника не меняет существа дела, и на этом можно не останавливаться.

Множественно-последовательная обмотка пониженной полюсности. Всматриваясь в выводы предыдущего раздела, можно убедиться, что обмотка, представленная на рис. 5, становится приемлемой, т. е. удовлетворяющей требованиям, которые предъявляются к замкнутым обмоткам, если к ней удвоить число щеток, поставив дополнительные щетки b_3 и b_4 на коммутаторных пластинах проводников *5* и *7*. Щетки b_1 и b_3 будут отрицательными, а щетки b_2 и b_4 — положительными; при этом вся обмотка разобьется на 4 параллельные ветви: две северные, состоящие соответственно из проводников групп *a* и *c*, и две южные — из проводников групп *b* и *d*. Таким образом в отличие от простой последовательной обмотки, требующей на коммутаторе принципиально всего двух щеток — по одной каждой полярности, — рассматриваемая обмотка требует обязательной установки удвоенного числа щеток, а поэтому мы вправе утверждать, что эта обмотка, являясь по принципу своего выполнения последовательной, представляет собой особую разновидность этого класса обмоток.

К таким же выводам мы пришли бы, если бы рассмотрели галопирующую простую последовательную обмотку, выполненную на некоторое число полюсов и внесенную в остов с удвоенным числом полюсов. Выводы будут справедливы и для множественно-последовательных обмоток как регулярных, так и галопирующих.

Вследствие этого мы можем формулировать полученные выводы в более общей форме.

Любая последовательная обмотка, выполненная на некоторое число пар полюсов p', может быть применена для машины с кратным числом пар полюсов $p=p'd$, причем для правильной работы

ее в этом случае нужно число щеток, необходимых для обычной последовательной обмотки в количестве двух, увеличить во столько раз, во сколько раз увеличено число полюсов (т. е. в d раз); при этом новые щетки — в равном количестве для северной и южной полярности — должны быть расставлены так, чтобы было по одной щетке каждой полярности на каждую группу из $2p'$ полюсов.

Полученный результат можно толковать и иным образом.

Кроме обычных регулярных и галопирующих множественно-последовательных обмоток, выполненных на заданное число пар полюсов и требующих для своей работы принципиально всего двух щеток — одной положительной и одной отрицательной, — можно для машин, у которых число пар полюсов p раскладывается на множители, применить как простые, так и множественно-последовательные обмотки, но выполненные на пониженное число пар полюсов $p' = \frac{p}{d}$, где d — один из делителей p; эти обмотки требуют обязательной установки d пар щеток — по одной паре на каждую группу из $2p'$ полюсов. Установка в d раз бо́льшего числа щеток увеличивает в d число пар параллельных ветвей, поэтому такие обмотки являются множественными; по принципу своего осуществления они последовательные, а потому, чтобы отличить их от обычных множественно-последовательных обмоток, мы будем называть их множественно-последовательными обмотками пониженной полюсности.

В заключение отметим, что на рис. 5 мы рассматривали вращающуюся обмотку в определенный момент времени и расставляли щетки так, чтобы проводники, образующие одну и ту же ветвь обмотки, имели одинаковое направление индуктируемых в них э. д. с., при этом мы мыслили щетки очень узкими. Практически щетки должны иметь ширину, бо́льшую одного коммутаторного деления, и отстоять друг от друга на расстоянии, равном полюсному делению по коммутатору. При такой расстановке щеток они несколько сдвинутся из положений, которые мы приняли при анализе рис. 5, причем ряд проводников выключится из параллельных ветвей и будет находиться в процессе коммутации. Это несколько затемнит картину, но существа дела не изменит; в реальной обмотке при $2p = 16$ число коммутаторных пластин должно быть в несколько раз больше числа их, принятого на рис. 5; поэтому изъятие из некоторых параллельных ветвей проводников, проходящих через нейтральные зоны, не сможет существенно сказаться на величинах э. д. с., индуктируемых в отдельных параллельных ветвях; эти э. д. с. практически можно считать одинаковыми.

Возможность практического использования множественно-последовательных обмоток пониженной полюсности. Уместен вопрос, имеют ли эти обмотки шансы на практическое применение? Прежде всего следует отметить, что при этих обмотках затрата меди на лобовые соединения больше, чем у обычных множественно-последовательных обмоток, что является несомненным недостатком их. Достоинств у них два: во-первых, увеличивается число возможных значений K при данном p, во-вторых, уменьшается потребная ширина щеток; последнее весьма существенно.

Действительно, анализ работы множественно-последовательных обмоток приводит к заключению, что у них ширина щетки должна быть не менее $K+1$ коммутаторных делений [5, стр. 111]. Это приводит к тому, что на практике применяют множественно последовательные обмотки с числом пар параллельных ветвей $a \not> 4$. В множественно-последовательных обмотках пониженной полюсности мы имеем и пониженное во столько же раз число пар параллельных ветвей. Дополнительное число пар параллельных ветвей для доведения их до заданного числа получается путем установки дополнительных щеток; вследствие этого, если понижение полюсности, а также и числа пар параллельных ветвей было в d раз, то щетка должна иметь ширину, равную *не* $a+1$ коммутаторным делениям, где a — задано, а $\frac{a}{d}+1$ коммутаторным делениям.

Так, в примере, который мы рассматривали выше при анализе ошибки Sequenz,

$$K = 66; \quad p = 8; \quad a = 4,$$

ширина щетки в обычной множественно-последовательной обмотке, если бы она была возможной, равнялась бы $a+1 = 4+1 = 5$ коммутаторным делениям, а в множественно-последовательной обмотке пониженной полюсности, которую можно осуществить с коэфициентом снижения полюсности $d=2$, потребная ширина щетки будет $\frac{a}{d}+1 = \frac{4}{2}+1 = 3$ коммутаторным делениям. Это делает новую обмотку заслуживающей внимания со стороны практического динамостроения.

Литература

1. R. Richter, Ankerwicklungen für Gleich- und Wechselstrommaschinen. Berlin 1920.
2. В. А. Толвинский, К теории якорных обмоток машин постоянного тока. „Электричество“ № 8, 1925, стр. 467.
3. В. А. Толвинский, Машины постоянного тока. Ленинград 1929.
4. В. А. Толвинский, К теории якорных обмоток машин постоянного тока. «Электричество» № 2, 1930, стр. 92.
5. H. Sequenz, Eine neue Ableitung der Gleichstrom-Ankerwicklungen. E u. M, 1933, стр. 469.
6. H. Sequenz, Versuch einer allgemeinen Theorie der Gleichstrom-Ankerwicklungen. A. f. E., т. 27, 1933, стр. 709.
7. H. Sequenz, Neue Wellenwicklungen. E u. M, 1934, стр. 273.
8. A. Maudult, H. Lamboeuf, La dynamo. Paris 1936.

Контроль установок для поверки измерительных трансформаторов

А. Д. Нестеренко

Энергетический институт
Академии наук СССР

ЭКСПЛОАТАЦИЯ любого измерительного устройства неизбежно связана с нарушением первоначально установленных соотношений между отдельными элементами его и, следовательно, требует постоянной проверки этих соотношений. Обычно проверка схемы производится очень редко, от случая к случаю, когда случайно будут обнаружены ошибочные результаты измерений данной схемой. Между тем в эксплоатации постоянство отдельных элементов (благодаря старению сопротивлений, истиранию струн ползунками, деформации механических деталей) нарушается все время. Может быть нарушена схема также во время монтажа при установке или после ремонта отдельных деталей схемы, а также рядом местных условий (температура, магнитные и электростатические поля). Поэтому крайне важны проверка схем после установки на месте эксплоатации и регулярная проверка их в процессе дальнейшей работы.

Сказанное относится и к схемам поверки измерительных трансформаторов. Широкое применение трансформаторов тока и напряжения и необходимость регулярного контроля их вызвали в последнее время распространение установок для их поверки. Последнее в свою очередь ставит перед нами задачу разработки методов подгонки и проверки этих установок, доступных в производственных условиях.

Погрешности современных измерительных трансформаторов невысоки, и определение этих погрешностей требует высокой точности измерения; так, если, исходя из возможностей, которые дают существующие схемы, считать, что измерение погрешностей должно быть выполнено с отклонением не более $\pm 10\%$, то требующуюся от схемы точность измерения погрешностей для трансформаторов тока класса 0,5 и 0,2 будет характеризовать следующая таблица.

Класс точности	0,5		0,2		0,5		0,2	
При токе в % от номинального	10	100	10	100	10	100	10	100
Допустимые отклонения в измерении погрешностей	0,1%	0,05%	0,05%	0,02%	4′	2′	2′	1′

Постепенное внедрение в последнее время в практику трансформаторов класса 0,2 и в лабораторной практике класса 0,1 еще более повышает требования, предъявляемые к точности измерительных установок.

Для подгонки и проверки схем применяются следующие методы:

1. Прямая проверка или методы сравнения схем. К этой группе относятся: метод последовательного измерения погрешностей измерительного трансформатора и метод параллельного сравнения схем.

2. Косвенная проверка; проверка осуществляется путем прямых измерений отдельных элементов, входящих в состав схемы.

3. Определение нулевых точек шкал схемы. Последний метод может быть также назван смешанным методом, так как при его применении, кроме непосредственного определения нулевых точек, приходится еще частично пользоваться косвенными методами для определения некоторых элементов.

Остановимся подробнее на каждом из методов.

Прямая проверка. Последовательное сравнение схем. Сравнение схем путем последовательного измерения погрешностей одного и того же трансформатора возможно при соблюдении ряда условий, гарантирующих постоянство погрешностей трансформатора, при помощи которого производится сравнение методов. К ним в первую очередь относятся: постоянство нагрузки вторичной цепи (как при переходе с одной схемы на другую, так и в процессе испытания), точность установки тока, постоянство напряжения и частоты источника питания и отсутствие остаточного намагничивания железного сердечника трансформатора. Так как все эти явления дают наименьшее влияние на величины погрешностей при токах, близких к номинальным, то этот метод вполне применим, если пользоваться поверкой трансформатора лишь в пределах 50—100% номинального тока, прибегая для получения разных отсчетов либо к добавочному изменению числа витков вторичной цепи трансформатора, либо к изменению нагрузки этой цепи, а также к шунтированию части тока (см. схемы, приведенные далее).

Изменение тока или напряжения при проверке должно производиться плавно от нуля до максимума и обратно, избегая включения или выключения сколь-либо значительного тока.

Проверка этого метода, выполненная автором в Институте метрологии, показала полную пригодность его при соблюдении указанных выше условий. Так, при сравнении трех аппаратов: 1) Шеринг — Альберти фирмы Гартман и Браун, 2) аппарата автора диференциального типа [1] и 3) схемы Арнольда, выполненной Институтом метрологии, расхождения между погрешностями, измеренными каждым из аппаратов в отдельности, различались между собой на величину $\leqq 0{,}01\%$ и $\leqq 0{,}4'$ в пределах 20—100% номинального тока.

Метод отличается простотой и доступностью, но имеет тот недостаток, что получение любых заданных погрешностей кропотливо и не всегда возможно (особенно для угловых погрешностей).

К этому методу относится иногда применяемый способ проверки схемы по «контрольному» трансформатору — образцовому трансформатору с известными погрешностями[1] (предварительное определение погрешностей осуществляется в поверочных учреждениях при помощи другой схемы).

Метод при соблюдении соответствующих предосторожностей может дать достаточную точность, но для небольшого числа определенных точек на каждой из шкал и поэтому может быть рекомендован для упрощенного контроля, особенно при применении метода проверки нулевых точек.

Ввиду отмеченных недостатков, а также затруднений, связанных во многих случаях с возможностью обеспечить указанные выше условия, и некоторой неуверенностью экспериментатора в неизменности погрешностей трансформатора при переходе от одного измерения к другому, более рациональным является предложенный автором метод параллельного сравнения схем.

Параллельное сравнение схем. Подобная схема для сравнения двух компенсационных устройств для поверки трансформаторов тока представлена на рис. 1.

По схеме рисунка первичные цепи обоих аппаратов R_1' и R_1'' включаются последовательно в цепь одного тока I_1, а вторичные R_2' и R_2'' — в цепь другого тока I_2, и проверка выполняется поочередным включением то одного, то другого аппарата при неизменном режиме I_1 и I_2.

Питание цепи I_2 должно быть осуществлено через устройство, позволяющее менять величину и фазу тока I_2 относительно I_1. Здесь может быть применено питание через фазорегулятор либо от одного из альтернаторов поверочного агрегата, от другого альтернатора которого питается цепь тока I_1. При таком способе питания возможно получить без труда любые заданные отношения между

[1] Этот метод неоднократно применялся в нашей и заграничной практике для проверки установок, находящихся в различных городах. Применяется, например, на Московском трансформаторном заводе для контроля установки для поверки трансформаторов напряжения.

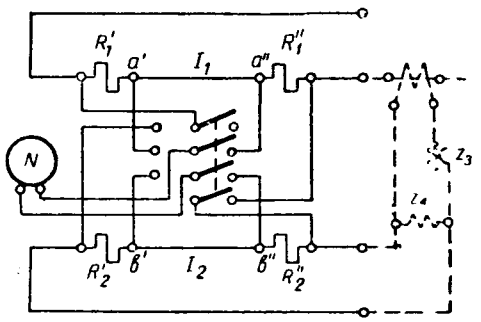


Рис. 1

I_1 и I_2. Могут быть также применены любые другие фазосдвигающие схемы, питаемые от общей с I_1 цепи через изолирующий трансформатор.

Простым способом является включение трансформатора тока, первичная цепь которого введена в цепь тока I_1, как это показано на рис. 1 пунктиром. Получение различных соотношений между токами, что необходимо для осуществления ряда отсчетов, может быть достигнуто изменением нагрузки вторичной цепи трансформатора (сопротивление z_3) и ответвлением части тока (сопротивление z_4).

Одновременный отсчет на обоих аппаратах крайне затруднителен ввиду невозможности разобщить электрически оба аппарата и необходимости сложного уравновешивания из-за этого (необходимо 3 гальванометра и добавочное регулирующее сопротивление для уравнения падений напряжений на участках $a'a''$ и $b'b''$).

Непосредственное сравнение двух схем при одновременном включении возможно лишь для методов поверки трансформаторов напряжения и для сравнения дифференциальных схем для поверки трансформаторов тока.

На рис. 2—4 приведены подобные схемы сравнений устройств для поверки трансформаторов напряжения.

На рис. 2 показано включение для сравнения двух компенсационных схем, на рис. 3 дано включение для сравнения компенсационной схемы с диференциальной и на рис. 4 — сравнение двух диференциальных схем для поверки трансформаторов напряжения.

Включение для непосредственного сравнения двух дифференциальных схем для поверки трансформаторов тока дано на рис. 5.

В этих схемах шкалы погрешностей коэфициента трансформации могут сравниваться как одного, так и противоположного знака путем перемены местами цепей одного из аппаратов.

Сравнение компенсационной схемы для поверки трансформаторов тока с диференциальной может быть выполнено при помощи искусственной схемы рис. 6.

В этом случае ток ΔI от вспомогательного источника тока, присоединенного к зажимам 3 и 4, проходя как по R_2', так и по R_Δ'', создает добавочные падения напряжения, пропорциональные отношению $\frac{\Delta I}{I_2}$, т. е. пропорциональные погрешностям. Устанавливая ток ΔI различной величины, а также меняя его по фазе, можно проверить любые точки шкалы погрешности коэфициента и угловой погрешности.

Вспомогательный ток ΔI и изменение его по фазе могут быть получены при помощи любой схемы, подобной устройству для компенсации и измерения погрешностей (от второго генератора, сидящего на одной оси с генератором, питающим основную цепь; от фазорегулятора; от любой искусственной схемы, приключенной к основной цепи через изолирующий трансформатор).

В схеме рис. 6 показания диференциального аппарата равны увеличению показаний компенсационной схемы, так как при $\Delta I = 0$ показания этой схемы не равны нулю, а соответствуют погрешностям трансформатора T_1. Для того чтобы начальные показания компенсационной схемы привести к нулю, шунт R_1' включают через добавочный трансформатор T_2 (рис. 7) и при помощи соответствующих переменных сопротивлений R_3, R_4, R_5, введенных в цепь трансформаторов T_1 и T_2, относительные погрешности этих трансформаторов приводят к нулевым значениям.

Сравнение компенсационной схемы с диференциальной может быть также выполнено по схемам рис. 8 и 9, где один из шунтов компенсационной схемы включается через трансформатор. Здесь также приходится считаться с погрешностями трансформаторов и учитывать их или введением соответствующих сопротивлений скомпенсировать их. Схема рис. 9 отличается тем, что непосредственное включение одной из цепей диференциальной схемы рис. 8 также заменяется включением через добавочный трансформатор T_3. Это облегчает установку любой величины и знака погрешности как коэфициента трансформации, так и угла.

Чтобы упростить работу и избавиться от необходимости постоянной проверки компенсации погрешностей разделительных трансформаторов, точки определяют, измеряя разности показаний.

Кроме указанных выше схем, можно составить и любые другие, сохраняя принцип параллельного измерения погрешности.

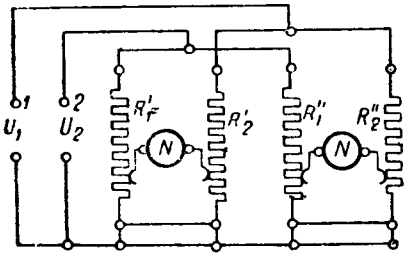


Рис. 2

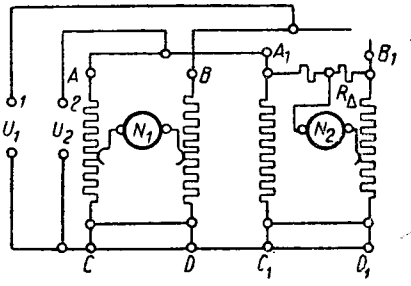


Рис. 3

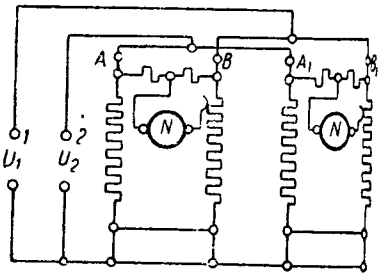


Рис. 4

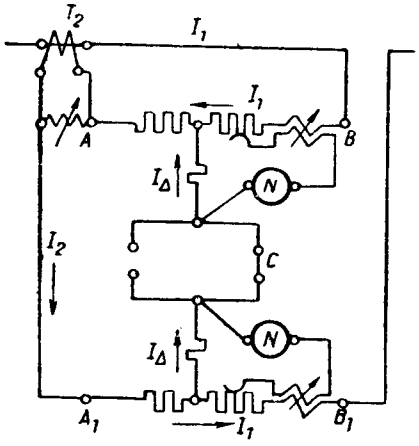


Рис. 5

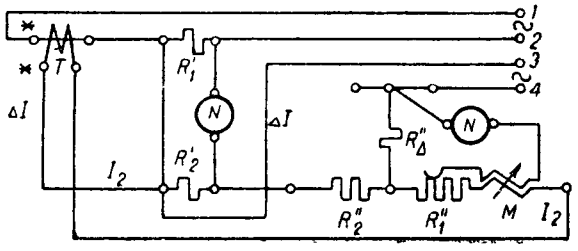


Рис. 6

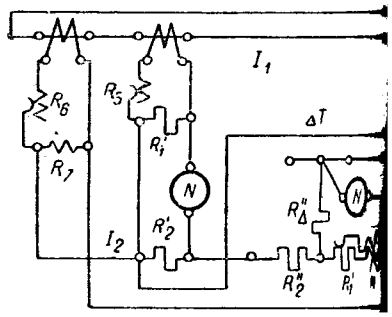


Рис. 7

При составлении схемы рис. 3 приходится принимать добавочные меры для компенсации влияния на гальванометр токов утечки. Схема дифференциального типа требует заземления у точки B_1; схема компенсационная при малой составляющей компенсируемого напряжения (как это имеет место, например, в схеме Шеринг — Альберти) нуждается в заземлении концов C или D. Поэтому необходимо, остановившись на заземлении одной из схем, гальванометр другой схемы защитить экраном, соединенным с соответствующей точкой этой схемы (например, заземлить точку D, а гальванометр N_2 с проводкой окружить экраном, соединив последний с точкой B_1).

В некоторых случаях влияние этих токов незначительно, что позволяет избежать экранировки. Чтобы определить, можно ли пренебрегать экранировкой и какую точку необходимо заземлить, поступают следующим образом: уравновешивают обе схемы сначала при заземлении точки B_1, а затем при заземлении точки D. Очевидно, что заземлена должна быть та схема, в которой переэлементы, зависит от влияния точности данного элемента на точность всей схемы. Например, подгонка и измерение сопротивлений и величины взаимоиндуктивности в схемах дифференциального типа, а также элементов устройства для измерения угловой погрешности в компенсационных схемах могут быть выполнены, принимая во внимание накопление погрешностей, с точностью порядка $\pm 0{,}2 - \pm 0{,}5\%$, что осуществимо в любых условиях и, с другой стороны, вполне допустимо с точки зрения требований, поставленных нами выше.

Значительно более высокие требования предъявляются к измерению сопротивлений компенсационных схем. Сопротивления эти должны быть подогнаны с точностью, значительно высшей по сравнению с точностью, требуемой от схемы [1]. Необходимы измерения, достоверные до тысячных долей процента, что делает метод недоступным для многих случаев практики.

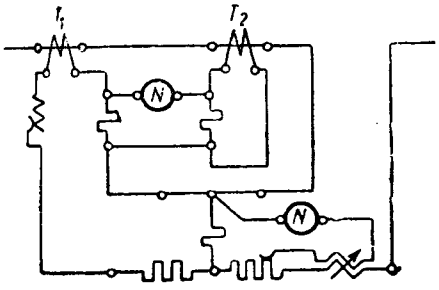


Рис. 8

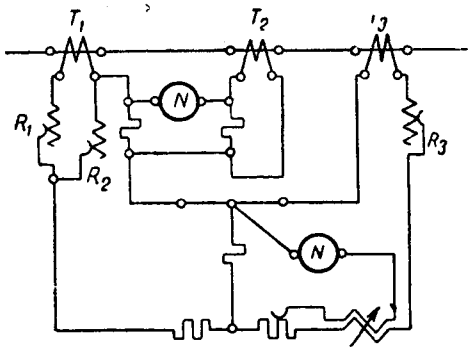


Рис. 9

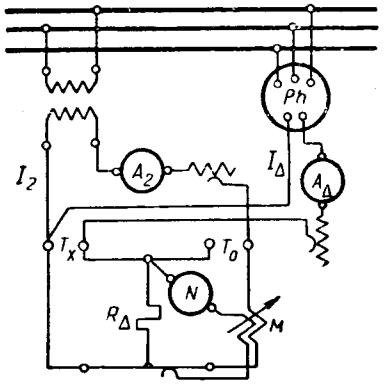


Рис. 9а

нос заземления вызывает бо́льшие изменения показаний. Величина изменения показаний другой схемы даст нам возможность судить о том, необходимо ли экранирование гальванометра этой схемы или им можно пренебречь.

Большое преимущество методов параллельного сравнения схем — это возможность контроля любой точки шкалы. Это может быть достигнуто как введением в схему добавочных напряжений или токов, фазу которых можно менять (например в схеме рис. 1, 3, 4, 6), так и изменением нагрузки трансформаторов и шунтированием части токов их цепей (например рис. 5, 7, 9). Эти способы дают возможность получить точки одной из шкал при заданных любых точках другой шкалы. Кроме того, при параллельном сравнении схем исключается влияние частоты на отсчеты угловых погрешностей, если это влияние в обеих схемах однозначно.

М. И. Левин в Московском институте метрологии, применяя предложенный автором метод параллельного сравнения двух аппаратов для поверки трансформаторов напряжения, пользовался следующим способом установки любых погрешностей. Вместо двух напряжений U_1 и U_2 (рис. 3) на схему подавались напряжения U_1 и небольшое напряжение ΔU между точками *1* и *2*. Последнее составлялось в свою очередь из двух слагающих: одной, находящейся в фазе с U_1, а другой — в квадратуре с ним. Эти напряжения получились, как и в схеме Берггана и Янсена [4], при помощи трансформатора напряжения с двумя вторичными цепями, в одной из которых составлялась схема Гуммеля из конденсаторов. Большим преимуществом такой схемы является простота получения любых погрешностей на одной шкале при любой заданной погрешности на другой.

Второй отличительной стороной метода параллельного сравнения является возможность сравнения между собой схемы и без измерительных трансформаторов.

Недостаток этого метода, как и метода последовательных измерений, — необходимость в схеме, показания которой не вызывают сомнений.

При пользовании методом последовательных измерений возникают затруднения, связанные с получением разных величин погрешностей.

Косвенная проверка. В этом случае соотношения в схеме и соответствующие поправки определяют вычислением на основании измерений всех элементов, входящих в схему.

Точность, с какой должны быть измерены отдельные

Недостатком метода с этой же точки зрения следует считать необходимость в измерениях таких величин, как емкость, индуктивность, постоянная времени сопротивлений и т. д.

Кроме того, пользуясь методом определения величины каждой составляющей в отдельности, нельзя учесть взаимного влияния элементов друг на друга в готовой уже схеме.

С другой стороны, — это единственный основной метод для проверки схем, не требующий второй схемы с известными характеристиками.

К типу косвенных может быть также отнесен метод проверки дифференциальных схем при помощи фазорегулятора и двух указывающих приборов-амперметров (или двух вольтметров в случае контроля схемы для поверки трансформаторов напряжения).

Схема контроля установок для поверки трансформаторов тока представлена на рис. 9а. При проверке необходимо при некотором токе I_2 (взятом в пределе от 0,3 до 1,0 номинального), установив указатель одной из шкал аппарата на положение, заданное для проверки, а на другой на нулевое деление, изменять величину и фазу тока фазорегулятора I_Δ, пока отклонение гальванометра не будет сведено к нулю. При этом в случае проверки шкалы коэфициента трансформации погрешность в процентах равна $\frac{I_\Delta}{I_2}\,100$ и при проверке шкалы углов погрешность в минутах равна $\frac{I_\Delta}{I_2}\,3438$.

Полагая погрешность амперметра A_2 не свыше 0,5% и амперметра $A\Delta$ не свыше 2%, можно считать, что метод позволяет проверить установку с точностью не ниже 3%. Этот метод крайне удобен для проверки дифференциальных схем, но требует миллиамперметра переменного тока (так как при полном токе, равном 5 А, например, для точки на шкале 0,5%, ток I^Δ равен всего 0,025 А). В качестве такого миллиамперметра может быть использован соответствующий вольтметр, предварительно проградуированный в цепи постоянного тока.

Определение нулевых точек шкал. Этот метод основан на том известном положении, что приращение какой-либо величины при относительно небольшой величине этого приращения может быть измерено с высокой точностью измерителем низкой точности. Погрешность в определении этого приращения по отношению к основной величине составит малую величину высшего порядка.

В применении к поверке измерительных трансформаторов это положение дает право утверждать, что приращение погрешностей любого измерительного трансформатора может быть измерено с достаточной точностью при помощи устройства, не отличающегося высокой точностью, а также, что достаточно иметь одну достоверную точку на шкале устройства, чтобы была обеспечена достаточная точность измерения погрешностей трансформатора на остальных точках шкалы. Необходимая для получения истинных значений погрешностей поправка, практически постоянная на основании сказанного для всех точек шкалы, равна смещению нулевого деления шкалы, поэтому задачу проверки схемы можно свести к отысканию поправки на положение на шкале нулевых точек.

Для демонстрации сказанного произведем соответствующие подсчеты для схемы Шеринг — Альберти.

Для этой схемы погрешность коэфициента трансформации в процентах

$$\Delta u = \left(\frac{u_н}{u} - 1\right) 100 = 100 u_н \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{R_2'}{R_4} \cdot \frac{R_3'}{R_1'} - 100, \qquad (1)$$

где R_1 и R_2 — сопротивления шунтов первичной и вторичной цепи;

R_1' и R_2' — полные сопротивления делителей, приключенных параллельно R_1 и R_2.

R_3' — сопротивление участка делителя R_1', на котором происходит компенсация при погрешности, равной Δu (на шкале этого сопротивления отсчитываются величины погрешностей);

R_4 — то же для делителя R_2'.

Полагая для нулевой погрешности $R_3' = R_3$, получим условие для этой точки:

$$0 = u_н \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{R_2'}{R_4} \cdot \frac{R_3}{R_1'} - 1 \quad \text{или} \quad \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{R_4}{R_2'} \cdot \frac{R_1'}{R_3} = u_н. \qquad (2)$$

При изменении в общем случае каждого из сопротивлений на величину δR для равновесия схемы необходимо изменить R_3 на величину $\delta_0 R$, которая и будет характеризовать новое нулевое положение. Эта величина определится из условия:

$$\frac{(R_1 + \delta R_1)(R_2' + \delta R_2')(R_3' + \delta R_3' + \delta_0 R)}{(R_2 + \delta R_2)(R_4 + \delta R_4)(R_1' + \delta R_1')} = \frac{1}{u_н}, \qquad (3)$$

откуда, пренебрегая малыми членами высших порядков найдем в относительных величинах

$$\Delta R_0 = \Delta R_2 + \Delta R_4 + \Delta R_1' - \Delta R_1 - \Delta R_2' - \Delta R_3, \qquad (4)$$

или, так как R_3 соответствует 100%, величина смещения нулевого положения на шкале

$$\Delta_0 = \Delta R_2 + \Delta R_4 + \Delta R_1' - \Delta R_1 - \Delta R_2' - \Delta R_3. \qquad (5)$$

Определим теперь величину изменения измеренной погрешности благодаря смещению нулевой точки.

Предположим, что некоторой погрешности Δu при всех сопротивлениях, равных расчетным, соответствует $R_3' = R_3 + \delta R_3$, при смещении же нулевой точки $R_3' = R_3 + \delta' R_3$.

Величина δR_3 определится из (1) и равна:

$$\delta R_3 = R_3 \frac{\Delta u}{100}. \qquad (6)$$

Величина $\delta' R_3$ определится из условия:

$$\Delta u = 100 u_н \frac{(R_1 + \delta R_1)(R_2' + \delta R_2')(R_3 + \delta R_3' + \delta' R_3)}{(R_2 + \delta R_2)(R_4 + \delta R_4)(R_1' + \delta R_1')} - 100, \qquad (7)$$

откуда, принимая во внимание равенство (5), нетрудно найти

$$\delta' R_3 = R_3 \frac{\Delta u}{100} + R_3 \Delta_0 + R_3 \frac{\Delta u}{100} (\Delta_0 + \Delta R_3') \qquad (8)$$

и приращение сопротивления, соответствующее погрешности в измерении Δu,

$$\delta'' R_3 = \delta' R_3 - \delta R_3 = R_3 \Delta_0 + R_3 \frac{\Delta u}{100} (\Delta_0 + \Delta R_3'). \qquad (9)$$

Если же ввести поправку на истинное положение нулевой точки, то

$$\delta''' R_3 = R_3 \frac{\Delta u}{100} (\Delta_0 + \Delta R_3'),$$

или в процентах (так как на шкале $\Delta u = 2\delta R_3$):

$$\Delta''' u = 2 R_3 \frac{\Delta u}{100} (\Delta_0 + \Delta R_3'). \qquad (10)$$

Чтобы дать представление о полученных величинах, подсчитаем погрешности для вполне реального случая.

Предположим, что при монтаже установки сопротивление R_1' увеличилось на 0,2 Ω (увеличена длина соединительных проводников между шунтом и аппаратом), тогда нулевая точка переместится по шкале на деление, соответствующее [формула (5)]

$$\Delta_0 = \Delta R_1' = \frac{0{,}2}{200} \cdot 100 = 0{,}1\%$$

(так как $R_1' = 200$ Ω), что совершенно недопустимо. С другой стороны, если бы это сопротивление увеличилось даже на 2Ω, но перемещение нуля было бы учтено, погрешность измерения была бы [формула (10)]:

$$\Delta''' u = 2 R_3 \frac{\Delta u}{100} \cdot \frac{2}{100} = 0{,}01 \Delta u$$

(так как $R_3 = 50$ Ω), т. е. всего 0,01 части от измеряемой погрешности.

Из тех же формул (5) и (10) нетрудно заключить, что относительное изменение любого другого сопротивления, входящего в состав выражения (1), даст такую же погрешность в измерении Δu и не будет практически влиять на это измерение при учете смещения нулевой точки даже при значительной величине этого изменения.

Сказанного достаточно, чтобы убедиться в том, что задача обеспечения высокой точности измерения, а следовательно, и контроля, может быть сведена к определению нулевых точек шкалы, так как даже те значительные изменения в соотношении элементов, какие могут появиться в процессе эксплоатации, не могут дать больших погрешностей, если истинные нулевые точки будут известны.

Необходимо указать, что положение нулевой точки шкалы погрешности коэфициента трансформации компенсационных методов зависит от соотношения величин всех сопротивлений, входящих в состав схемы, и при установке на месте и в процессе эксплоатации легко может меняться. В отличие от этого в диференциальных схемах это положение фиксировано местом припайки разностного сопротивления, и оно сместиться может лишь при сдвиге шкалы или контактных пружин. Это относится также и к шкалам устройств для измерения угловой погрешности в обоих типах методов (имеющая место в компенсационных методах поправка на фазный сдвиг сопротивлений остается постоянной). Поэтому при рациональной конструкции этих устройств и тщательном изготовлении сдвиги нулевых точек представляют исключительный случай.

Метод проверки нулевых точек заключается в том, что схему, например, поверки трансформаторов тока в собранном виде включают таким образом, чтобы по цепям схемы протекали токи, отношение между которыми равно номинальному, и затем приравнивают падения напряжения обеих цепей схемы. В случае поверки трансформаторов напряжения подобному же условию должны удовлетворять приложенные напряжения.

Метод проверки нулевых точек для компенсационных схем впервые опубликовал Арберг [2], который предложил для этого к делителям обеих цепей подводить одно и то же напряжение.

Предложенный, однако, Арбергом метод проверки нулевых точек аппарата Шеринг — Альберти для поверки трансформаторов напряжения не дает вполне удовлетворительного решения вопроса. Так как делители первичной и вторичной цепи этого аппарата рассчитаны на различные напряжения, то Арберг в цепь делителя измерительной ветви вводит добавочные сопротивления с таким расчетом, чтобы к измерительной цепи была приложена требуемая часть напряжения, подведенного к схеме. Для проверки нуля шкалы погрешности коэфициента трансформации приходится в этих случаях измерять ряд отдельных сопротивлений и определять нулевое положение вычислением. Такой метод не может гарантировать высокой точности при большом числе входящих в схему сопротивлений (6 шт.). Не дает эта схема надежной проверки также и нуля шкалы угловых погрешностей, так как введение добавочных сопротивлений изменяет постоянную времени цепи измерительной ветви.

Чтобы получить высокую точность определения нулевой точки шкалы погрешности коэфициента трансформации в аппарате Шеринг — Альберти, автор разработал схе-

ну согласно рис. 10. В схеме R_7 — переменное добавочное сопротивление любой точности, R_5 и R_6 — сопротивления, соотношение между которыми может быть установлено с большой точностью. Соотношение $(R_5 + R_6) : R_5$ устанавливается равным отношению расчетных напряжений, прикладываемых к цепям аппарата. При определении положения нулевой точки сначала выключают гальванометр N_1 и при помощи R_7 приводят указатель N_2 к нулевому положению. Затем, включив N_1, доводят его к нулю, изменяя положение движка на шкале погрешности коэфициента трансформации.

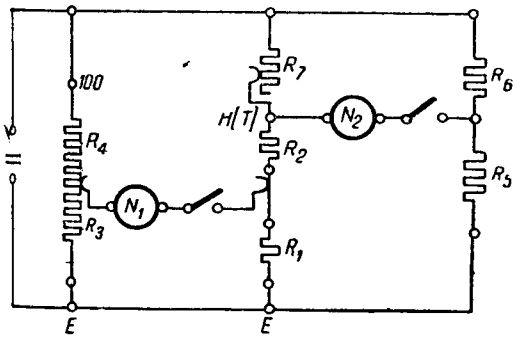


Рис. 10

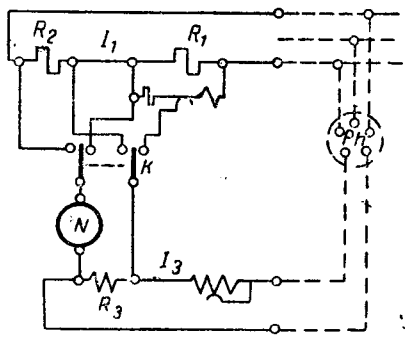


Рис. 11

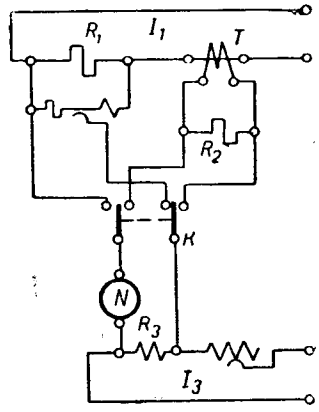


Рис. 12

Проверить нулевую точку шкалы угловых погрешностей этим методом возможно, если сопротивления R_5 и R_6 имеют одинаковую постоянную времени. В противном случае выполнение этой проверки осуществимо лишь методами сравнительных измерений, описанными выше.

Значительным преимуществом схемы рис. 10 по сравнению со схемой Арберга являются непосредственное определение положения нулевой точки без вычислений и необходимость определения лишь одного соотношения $(R_5 + R_6) : R_5$, которое может быть выполнено с высокой степенью точности.

Схема контроля по Арбергу установки Шеринг — Альберти для поверки трансформаторов тока имеет тот недостаток, что в ней сверяются лишь делители напряжения, а не вся схема в целом. Нарушение соотношения между сопротивлениями шунтов не может быть обнаружено этим методом. В собранном виде с шунтами, компенсационную схему можно выверить при равенстве номинальных токов по схеме рис. 11 и при неравенстве этих токов — по схеме рис. 12.

В первом случае обе цепи аппарата (R_1 и R_2) включают последовательно и попеременно уравновешивают при неизменном токе I_1 падения напряжения на обоих сопротивлениях при помощи вспомогательной цепи R_3. При этом сначала, подключив R_3 к неизменному сопротивлению R_2, приводят I_3R_3 по величине и по фазе к I_1R_2, а затем, переключив его к переменному сопротивлению R_1, приравнивают к нему I_1R_1 изменением сопротивления R_1. Отсчеты на шкалах R_1 после уравновешивания и будут соответствовать истинным нулевым точкам (в общем случае для полного совпадения и по фазе понадобится также введение реактивной составляющей цепи R_1, т. е. появится смещение и нуля шкалы угловой погрешности).

Если схема предназначается для случая неравенства номинальных токов цепей трансформатора, проверка нуля может быть выполнена согласно рис. 12 при помощи специального трансформатора тока T с секционированной первичной обмоткой. Такой трансформатор имеет первичную обмотку, состоящую из большого количества строго идентичных секций, которые могут быть соединены либо последовательно либо параллельно, благодаря чему погрешности трансформатора остаются постоянными при разных включениях первичной обмотки [2].

Проверка выполняется в таком порядке: сначала включаются оба шунта R_1 и R_2 с равными номинальными токами при непосредственном включении R_1, когда первичная цепь трансформатора T соединена для коэфициента трансформации *1;* затем шунт R_1 заменяют проверяемым, а первичные обмотки трансформатора T соответственно переключаются [3]. Питание цепи тока I_3 показано через фазорегулятор и может быть осуществлено по любому из методов, указанных для схемы рис. 1.

Контроль нулевых точек шкал диференциальных схем для поверки трансформаторов напряжения может быть выполнен согласно рис. 13. Контроль нулевых точек подобных аппаратов диференциального типа для поверки трансформаторов тока может быть осуществлен по схеме рис. 14, где обе цепи включаются последовательно.

В последних двух случаях отсчеты на обеих шкалах при полном отсутствии отклонения нулевого индикатора и будут соответствовать истинным нулевым точкам аппарата.

Контроль измерения погрешности коэфициента трансформации компенсационным методом со схемой уравновешивания по Арнольду [5] может быть выполнен также указанным ниже способом перемещения шунтов. При этом проверка шунтов с одинаковым номинальным сопротивлением может быть произведена непосредственным перемещением. Поверка же шунтов для номинальных токов, не равных номинальному току вторичной цепи, может быть выполнена при помощи трансформатора с сек-

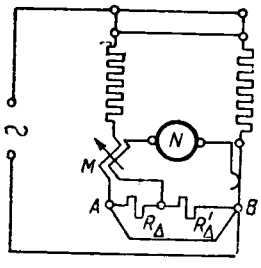


Рис. 13

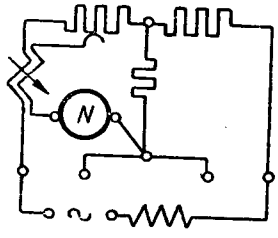


Рис. 14

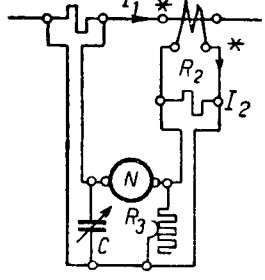


Рис. 15

[2] Трансформатор подобного типа, разработанный автором для первичных номинальных токов от 2,5 до 100 А, изготовляется мастерскими Киевского индустриального института к установкам для поверки трансформаторов тока.

[3] Такая проверка должна быть проведена с теми же предосторожностями, с какими должно быть выполнено сравнение методом последовательных измерений погрешностей.

ционированной первичной обмоткой способом, указанным выше.

В методе перемещения шунтов производят два измерения: первое в нормальном включении и второе измерение после перемены шунтов местами.

Предположим, что измерение осуществляется при помощи схемы рис. 15. Если равновесие схемы достигается при $R_3 = R_3'$, то

$$\frac{1}{u} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{R_3' + R_2}{R_3'}. \qquad (11)$$

Пусть после взаимного перемещения шунтов R_1 и R_2 равновесие будет достигнуто при $R_3 = R_3''$, тогда

$$\frac{1}{u} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{R_3'' + R_1}{R_3''}. \qquad (12)$$

Взяв произведение (11) на (12), найдем:

$$\frac{1}{u} = \sqrt{\frac{R_2R_1 + R_1R_3' + R_2R_3'' + R_3'R_3''}{R_3'R_3''}},$$

откуда с достаточной для практики точностью

$$\Delta u \approx 0{,}5\,\frac{R_1R_3' + R_2R_3''}{R_3'R_3''}\,100 \qquad (13)$$

или

$$\Delta u \approx 0{,}5\left(\frac{R_1}{R_3''} + \frac{R_2}{R_3'}\right)100 \approx 0{,}5\left(\frac{R_1}{R_3'} + \frac{R_2}{R_3''}\right)100. \qquad (14)$$

При применении формулы (13) необходимо помнить, что эта формула выведена в предположении, что сопротивление R_3 приключено параллельно сопротивлению R_2, введенному во вторичную цепь трансформатора. Этот случай соответствует положительному значению Δu. При отрицательном знаке Δu R_3 приходится подключать параллельно шунту R_1, введенному в первичную цепь трансформатора. Поэтому в формуле (13) следует присваивать значению R_3 знак (+) при введении его во вторичную цепь трансформатора и знак (—) в том случае, когда его приходится вводить в первичную цепь.

Выражение (14) может быть представлено еще в виде:

$$\Delta u = \frac{\Delta_1 u + \Delta_2 u}{2}, \qquad (15)$$

где $\Delta_1 u + \Delta u$ — величины погрешностей, полученных в результате первого и второго измерения.

Применение выражения (15) удобно в том случае, когда отсчет на аппарате дан непосредственно в величинах погрешности коэфициента трансформации.

Метод перемещения шунтов дает возможность выявить и исключить неравенство угловых погрешностей самих шунтов. При равенстве угловых сдвигов сопротивлений шунтов наличие этих сдвигов не оказывает влияния на точность измерения угловой погрешности трансформатора. В противном случае в результате перемещения мы получим разные величины, и истинное значение угловой погрешности

$$\delta = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2}, \qquad (16)$$

где δ_1 и δ_2 — соответствующие угловые погрешности, полученные в результате первого и второго измерения.

Достоинством метода определения нулевых точек являются возможность проверить установку в целом, не имея в своем распоряжении другой схемы, простота и легкость выполнения ее для диференциальных схем и схем компенсационных при равенстве номинальных токов или напряжений обеих цепей. Однако этот метод не всегда дает возможность обнаружить погрешности, которые могут возникнуть при неисправности в цепях (например ошибки в монтаже, разрыв одного из двух параллельно включенных сопротивлений или короткого замыкания в сопротивлениях). Поэтому он должен дополняться еще вспомогательной проверкой по одному из предыдущих методов. Эта проверка может быть значительно упрощенной, не отличающейся высокой точностью.

Существенным недостатком метода является отмеченная выше невозможность прямой проверки нуля в компенсационных схемах при неравенстве номинальных токов или напряжений обеих цепей аппарата.

Наличие недостатков в каждом из методов, описанных выше, не дает возможности остановиться на одном из них как универсальном и рекомендовать можно лишь комбинированное применение их в зависимости от типа схемы и требований, предъявляемых к проверке.

Если говорить о различных схемах, то для диференциальных, а также компенсационных методов при равенстве номинальных токов или напряжений обеих цепей достаточна проверка нулевых точек, а также контрольная проверка двух-трех точек, что может быть выполнено либо при помощи метода косвенной проверки либо при помощи «контрольного» трансформатора.

Проверка компенсационных установок для трансформаторов тока при неравенстве номинальных токов цепей может быть проведена методом контроля нулевых точек с применением секционированного трансформатора (схема рис. 12).

В поверочных учреждениях, располагающих возможностью точных измерений, контроль должен осуществляться методом косвенных измерений с параллельным контролем по какому-либо другому методу.

Что касается требований, предъявляемых к самому контролю в отдельных случаях, то:

1. Полную проверку шкал установки следует производить лишь при выпуске с завода и типовых испытаниях. В этих случаях наиболее удобным является метод параллельного сравнения с другой схемой, а также, если это возможно, проверка нулей с косвенной проверкой основных элементов. Полная проверка также желательна после ремонта установки. Если это производится в производственной обстановке, то можно воспользоваться методом проверки нуля и «контрольным» трансформатором или косвенным методом при помощи фазорегулятора и указывающих приборов.

2. При установке на месте необходима лишь проверка для выявления дефектов монтажа и влияния внешних магнитных полей.

3. Контроль во время эксплоатации может быть сведен к упрощенной проверке. Для этого достаточна проверка нулевых точек и по одной точке на каждой шкале при помощи «контрольного» трансформатора или при помощи фазорегулятора и указывающих приборов.

Во всех случаях при проверке компенсационных схем большую помощь может оказать упомянутый выше секционированный трансформатор.

При пользовании «контрольным» трансформатором обязательно соблюдение основных условий, указанных при описании метода последовательных измерений погрешностей.

Проверка наличия мешающих внешних магнитных полей. При установке измерительного устройства на месте желательно проверить, нет ли в данном месте наличия внешних магнитных полей, способных создать добавочные погрешности. Эта проверка должна быть проведена при нормальном режиме работы всех машин и линий переменного тока, находящихся вблизи места установки измерительного устройства. Выявить мешающие магнитные поля нетрудно при проверке нулевой точки, если эту проверку производить при двух противоположных направлениях тока в цепях аппарата. Если разным направлениям тока в схеме уравновешенному состоянию будут соответствовать различные отсчеты, то налицо мешающие магнитные поля. Так как влиянию подвержена как цепь самого аппарата, так и цепь нулевого индикатора, то для облегчения анализа схемы желательно каждую из этих частей установки проверить в отдельности. Это достигается тем, что цепь гальванометра подключается к аппарату через двухполюсный переключатель, и уравновешивание при каждом направлении тока в схеме выполняется при двух различных направлениях тока в цепи нулевого индикатора.

Чтобы выявить влияние внешних магнитных полей на измерительные трансформаторы, первичные шунты (в компенсационной схеме) или на любой другой элемент схемы, необходимо сравнить погрешности в нормальной схеме при двух противоположных направлениях тока только в данном элементе при неизменном направлении тока в остальных элементах.

Проведение такой проверки должно быть выполнено с соблюдением всех условий, обеспечивающих постоянство погрешностей трансформаторов.

Все описанные (частью разработанные самим автором) методы проверены автором и использованы для практики

Так например, методы определения нулевых точек дифференциальных аппаратов согласно схемам рис. 13, 14 в комбинации с методом косвенных измерений, а также методы параллельного сравнения аппаратов по схемам рис. 4 и 5 применяются для контроля аппаратов для поверки трансформаторов тока и напряжения, выпускаемых мастерскими Киевского индустриального института и сетью Главного управления мер и весов при приемке этих установок; метод параллельного сравнения аппаратов применен Институтом метрологии при типовых испытаниях установок.

Литература

1. А. Д. Нестеренко, «Электричество» № 15, 1935.
2. F. Ahrberg, ETZ, 1925, стр. 500.
3. С. С. Городецкий, Измерения на высоком напряжении, ОНТИ, 1934, стр. 220.
4. A. Berghahn und H. Janssen, A. f. E., 24, 1935, стр. 356.
5. A. Arnold, JIEE, London, 68, 1930, стр. 898.

Измерение малых сопротивлений диференциальными аппаратами для поверки трансформаторов тока

М. И. Левин

Московский Государственный институт мер и весов

ПРИ ПОВЕРКЕ трансформаторов тока на месте установки часто необходимо, кроме определения погрешностей, измерить сопротивление, которым в данной установке нагружен трансформатор. Сопротивление это обычно мало (порядка 0,5—1 Ω) и измерить его при помощи вольтметра, амперметра и ваттметра затруднительно. При измерении же постоянным током не учитывается реактивное сопротивление. Можно показать, что с достаточной для практики точностью активные и реактивные сопротивления могут быть измерены при помощи любого диференциального аппарата для поверки трансформаторов тока.

Диференциальные аппараты[1], принципиальная схема которых изображена на рис. 1, должны измерять отношение $\frac{I_x - I_0}{I_0}$ и угол между током $\dot{I}_0$, протекающим в цепи, приключаемой к вторичным зажимам образцового трансформатора, и $\dot{I}_x$—током цепи, присоединяемой к вторичным зажимам испытуемого трансформатора. Сопротивление ΔR, по которому течет ток $\Delta\dot{I}$, должно быть, как правило, чисто активным.

Векторная диаграмма токов изображена на рис. 2. Угол между токами $\dot{I}_x$ и $\dot{I}_0$ обычно очень мал, поэтому можно с достаточной для практики точностью разность $I_x - I_0$ заменить проекцией вектора $\Delta\dot{I}$ на направление вектора $\dot{I}_0$ и, следовательно, отношение $\frac{I_x - I_0}{I_0}$ — отношением $\frac{\Delta I \cos\phi}{I_0} = \frac{AB}{OB}$ (рис. 2); величина угла между векторами в радианах может быть принята равной отношению проекции того же вектора $\Delta\dot{I}$ на направление, перпендикулярное вектору I_0 к величине этого вектора;

$$\delta = \frac{\Delta I \sin\phi}{I_0} = \frac{AC}{OB}.$$

Чтобы выразить угол в минутах, нужно это отношение умножить на 3438.

Почти все современные конструкции диференциальных аппаратов для поверки трансформаторов тока измеряют отношения этих проекций вектора $\Delta\dot{I}$ к току $\dot{I}_0$.

Показание f первой шкалы аппарата равно отношению $\frac{\Delta I}{I_0}\cos\phi$, выраженному в процентах:

$$f = \frac{\Delta I}{I_0}\cos\phi \cdot 100; \qquad (1)$$

показание второй (δ') — отношение $\frac{\Delta I}{I_0}\sin\phi$, переведенному в минуты:

$$\delta' = \frac{\Delta I}{I_0}\sin\phi \cdot 3438. \qquad (2)$$

[1] См., например, Городецкий, Измерения на высоком напряжении, 1934, стр. 226; Нестеренко, Методы испытания измерительных трансформаторов, „Электричество" № 3, 1935.

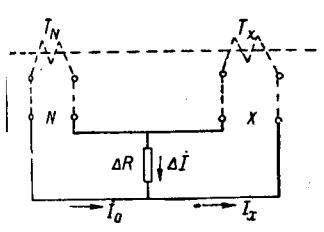


Рис. 1

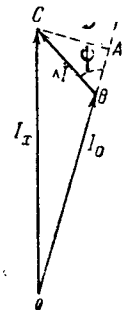


Рис. 2

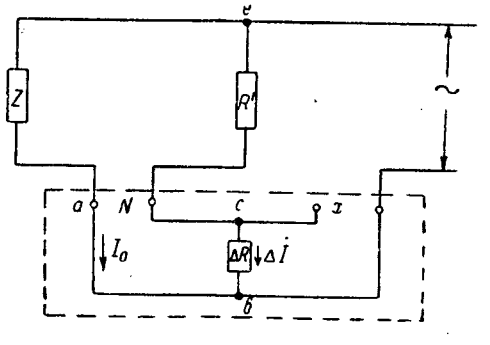


Рис. 3

Из (1) и (2) нетрудно получить:

$$\frac{f}{100}+j\frac{\delta'}{3438}=\frac{\Delta I}{I_0}\cos\psi+j\frac{\Delta I}{I_0}\sin\psi=$$

$$=\frac{\Delta I}{I_0}e^{j\psi}=\frac{\Delta\dot{I}}{\dot{I}_0}. \qquad (3)$$

Схема включения аппарата для измерения сопротивлений изображена на рис. 3. Здесь: z — измеряемое сопротивление, R' — дополнительное чисто активное сопротивление.

Обозначив Z_{ab} — сопротивление цепи аппарата между точками a и b, и U — напряжение между точками e и b, имеем:

$$\frac{\dot{U}}{\dot{I}_0}=Z+Z_{ab}$$

и

$$\frac{\dot{U}}{R'+\Delta R}=\frac{\dot{U}}{R}=\Delta\dot{I};$$

откуда

$$Z+Z_{ab}=R\frac{\Delta\dot{I}}{\dot{I}_0}.$$

Так как согласно (3) показания шкал аппарата дают величину $\frac{\Delta\dot{I}}{\dot{I}_0}$, то

$$Z+Z_{ab}=r+r_{ab}+j(x+x_{ab})=\frac{f}{100}+j\frac{\delta'}{3438}, \qquad (4)$$

где r — активная часть измеряемого сопротивления;

x — реактивная;

r_{ab} — активное сопротивление между точками a и b;

x_{ab} — реактивное сопротивление между этими точками, а $R=R'+\Delta R$.

Следовательно,

$$\left.\begin{aligned} r&=R\frac{f}{100}-r_{ab}\\ \text{и}\qquad x&=R\frac{\delta}{3438}-x_{ab}.\end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

В СССР диференциальные аппараты для поверки трансформаторов тока[2] конструкции А. Д. Нестеренко изготовляются экспериментальными мастерскими Киевского индустриального института (КИИ).

Схема аппарата изображена на рис. 4. Здесь: BT — воздушный трансформатор; N — движок реохорда, служащего для компенсации погрешности

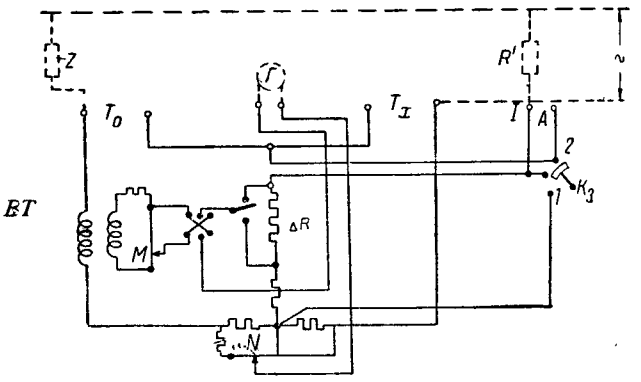


Рис. 4

тока (f); M — движок реохорда, служащего для компенсации угловой погрешности (δ); Γ — вибрационный гальванометр; A — зажимы, к которым при поверке трансформаторов приключается амперметр для контроля правильности включения трансформаторов; K_3 — переключатель, включающий амперметр.

При измерении сопротивлений этим аппаратом дополнительное сопротивление R' следует приключать к зажиму 1, как показано на рис. 4; переключатель K_3 должен находиться в положении 2. Как и при поверке трансформаторов, устанавливают желательное значение тока и, вращая рукоятки аппарата, добиваются отсутствия тока в вибрационном гальванометре. Получаемые при этом показания обеих шкал f и δ' дают возможность по формулам (5) вычислить искомые значения r и x. Конечно, сопротивления r_{ab} и x_{ab} должны быть известны. В аппарате КИИ r_{ab} имеет величину порядка 0,2Ω, x_{ab} — не превышает 0,05 Ω.

Сопротивление R' должно быть выбрано так, чтобы во избежание больших ошибок отсчеты f и δ' при измерении производились в конце шкал. Для этого при измерении сопротивления порядка 0,5 Ω удобно $R'+\Delta R$ принять равным 20Ω. Удобно также R' сделать в виде небольшого магазина, подогнанного к данному аппарату, позволяющего придавать R значения 10, 20, 30, 40 и 50 Ω. Может, конечно, быть использован обыкновенный точный магазин сопротивлений. При работе аппарата КИИ с гальванометром, выпускаемым институтом же для этих аппаратов, измерения сопротивления следует производить при токе не меньшем 3 А, так как в противном случае чувствительность гальванометра недостаточна. При хорошей подгонке аппарата и добавочного сопротивления R' измерение может быть произведено с точностью порядка 0,01 Ω.

[2] Полное описание этих аппаратов можно найти в статье А. Д. Нестеренко. „Электричество“ № 15, 1935.

Памяти В. К. Лебединского

ПОСЛЕДНИЕ два десятилетия XIX века ознаменовались бурным развитием электротехники. Первый электротехнический конгресс в Париже, на котором была установлена система электрических единиц, первая Парижская электротехническая выставка, на которой впервые демонстрировались изобретения Эдисона (лампы, машины, система распределения энергии), привлекли к электротехнике внимание всего мира. В России, где еще раньше был сделан ряд важных электротехнических изобретений (изобретения Яблочкова, Лодыгина и др.), электротехника пленила многие умы. В этот период из стен Петербургского университета, где проф. Боргман, Егоров и др. увлекали студентов идеями Фарадея и Максвелла, вышла группа молодых физиков, посвятивших себя вопросам электротехники. Среди них были А. С. Попов, изобретатель радиотелеграфа, Б. Л. Розинг, положивший начало современным методам телевизии и др. В их числе был также и В. К. Лебединский.

Начав работать в Петербургском университете, по окончании его в области чистой физики Владимир Константинович скоро стал все больше и больше уклоняться в сторону теоретической электротехники. Поступив лаборантом по физике в Электротехнический институт, он затем начинает читать в нем специальный курс переменных токов, организует первый лабораторный практикум по переменному току и выполняет первую свою научно-исследовательскую работу, изучая Румкорфову спираль, единственный тогда (1895 г.) электромагнитный генератор токов очень высокого напряжения.

В Петербургском политехническом институте В. К. Лебединский в течение ряда лет читал основанный им теоретический курс радиотехники (Электромагнитные колебания). В Политехническом же институте он получил и ученую степень, блестяще защитив диссертацию «Возникновение электрической искры и свето-электрическое действие».

В этой работе В. К. Лебединский подвел итоги ряда своих исследований в области открытого им аномального свето-электрического действия на искру.

Изучению явления искры посвящена целая серия трудов Владимира Константиновича. К этому изучению его привела близость с А. С. Поповым, изобретение которого — «искровой беспроволочный телеграф» — положило начало современной радиотехнике. В области радиотехники В. К. Лебединский работал всю жизнь. Он был одним из выдающихся создателей школы русских радиотехников и в этом отношении был продолжателем дела, начатого А. С. Поповым. Благодаря неутомимой деятельности В. К. Лебединского, умевшего вдохновлять окружавших его учеников, советская радиотехника непосредственно после Октябрьской революции вышла на одно из первых мест в мире.

Вообще деятельность В. К. Лебединского была весьма разнообразна и разностороння. Человек с глубокой эрудицией, он всегда жил научными интересами и с увлечением отдавался исследовательской работе. В то же время с неменьшим увлечением он отдавался и делу преподавания в Электротехническом институте, в Военно-инженерном училище и на курсах Лесгафта, в Петербургском политехническом институте, в Рижском, а после его эвакуации, в Иваново-Вознесенском политехническом институте, в Нижегородском университете, в Ленинградском женском медицинском институте, в Ленинградском институте инженеров железнодорожного транспорта и, наконец, в Военно-медицинской академии РККА им. Кирова. В двух последних школах он работал до самой смерти. Можно сказать, что он умер на профессорском посту.

Профессорскую деятельность он очень любил. Он дорожил общением с молодым, ищущим знаний, поколением. Во все свои курсы, будь то курсы физики или курсы электротехнического характера, он всегда вносил свежесть мысли, оригинальность замысла. Изложение было тоже всегда блестящее. Читая курсы для студентов разных специальностей, В. К. Лебединский старался войти в интересы той или иной отрасли знаний и давал в своих курсах именно то, в чем специальность нуждалась. Его лекции по физике в Женском медицинском институте, в Военно-медицинской академии, на биологических курсах Лесгафта имели совсем другой уклон, чем аналогичные курсы, читавшиеся им в Университете и в технических школах.

Он увлекался лекциями и увлекал слушателей. Лекторский талант Владимира Константиновича особенно проявлялся в его выступлениях на конференциях, съездах и т. п., где он всегда был желанным докладчиком, дававшим в своих сообщениях ценнейший материал, притом в изящной и оригинальной форме.

Материалом для докладов служили и многочисленные личные научно-исследовательские работы, и результаты глубокого знакомства В. К. с русской и иностранной литературой.

Литературной работой В. К. Лебединский увлекался также очень много. Совсем молодым уче-

ным начал он работать секретарем в журнале «Электричество», объединявшем тогда большую группу молодых электротехников. С «Электричеством» покойный был связан всю жизнь, давая журналу свои научные работы, свои блестящие обзорные статьи и статьи по истории электротехники.

Много сил затратил В. К. и на работу по редактированию основанного при его ближайшем участии журнала «Телеграфия и телефония без проводов». Это был один из первых новых технических журналов, созданных после Октябрьской революции. Он возник в 1918 г. и выходил в самый разгар революции, гражданской войны и интервенции, когда молодая республика, отрезанная от всего мира, особенно нуждалась в радиосвязи. В. К. работал также редактором журналов «Вестник военной радиотелеграфии» (1917 г.) и «Радиотехник».

Работая в журналах, В. К. Лебединский одновременно выпускал ряд отдельных курсов, монографий по разным отделам физики и радиотехники. Многие из них выдержали несколько изданий (например, «Электричество и магнетизм» — 6 изданий).

В. К. Лебединский был чрезвычайно талантливым популяризатором в литературе и в выступлениях. Его труды популярного характера, оставаясь всегда строго научными, легко читаемы и занимательны. Популярные книги «Электричество и его служба человеку», «Электричество в радио» переиздавались много раз. Незадолго до смерти он закончил популярный труд «Занимательное в электричестве» — результат его общения и бесед с молодыми пионерами-энтузиастами науки. Труд этот печатается.

В. К. Лебединский был деятельным общественником. Работе общественной он отдавал свои силы, знания и способности. Он был организатором и первым председателем Общества радиоинженеров, организатором съезда радиоспециалистов (1921 г.), организатором съезда физиков в Н. Новгороде (1922 г.), был постоянным активным участником электротехнических съездов и т. д. Где бы он ни жил, он всегда погружался в общественную деятельность, читал публичные лекции в городских и заводских аудиториях Москвы, Ленинграда, Нижнего Новгорода, Сормова, Владимира и других городов, собирая вокруг себя молодых начинающих ученых. Он никогда не жалел времени для бесед с своими учениками, толкая их на научные исследования, возбуждая в них интерес к науке. Неудивительно, что из школы Лебединского вышел ряд выдающихся исследователей в области радиотехники. Одной из важнейших сторон деятельности В. К. Лебединского было его участие в работах по созданию Нижегородской радиолаборатории. С группой энтузиастов-радиотехников, в значительной части своих учеников, он создал Нижегородскую радиолабораторию, сыгравшую исключительную роль в истории русской радиотехники, получившую затем имя великого электрификатора В. И. Ленина и награжденную за заслуги перед страной орденом Красного Знамени.

Научную работу В. К. вел до последних дней. Последнее его исследование — «Вариации явления Баркгаузена» — представляет большой интерес (печатается ниже).

В. К. Лебединский был одним из последних электротехников-энциклопедистов, воспитанных в школе физиков и самостоятельно сделавших из себя электриков.

Люди, подобные Владимиру Константиновичу, создавали основы научной электротехники и подготовили путь для современных колоссальных научных достижений в этой области.

М. А. Шателен, В. Ф. Миткевич

Основные даты из жизни и деятельности проф. В. К. Лебединского

В. К. ЛЕБЕДИНСКИЙ родился в 1868 г. в г. Петрозаводске в семье преподавателя. По окончании физико-математического факультета Петербургского университета в 1891 г. работал сначала в качестве лаборанта по физике в Электротехническом институте и в университете. В Электротехническом институте вскоре начал вести самостоятельное преподавание по курсу «Переменные токи». Здесь же в 1895 г. выполнил свою первую исследовательскую работу. Затем преподавал физику на курсах Лесгафта (1899—1913) и в военно-инженерном училище. С 1910 г. читал лекции в Петербургском Политехническом институте по организованному им курсу теоретической радиотехники.

В 1913 г. был избран профессором физики в Рижском Политехническом институте. В 1915—1918 гг. продолжал эту работу в Москве, куда был эвакуирован Рижский Политехнический институт.

В 1916 г. защитил диссертацию и получил ученую степень в Петроградском Политехническом институте (ныне Ленинградском индустриальном институте).

В 1918 г. участвовал в организации Иваново-Вознесенского Политехнического института, в котором состоял профессором до 1919 г.

С 1918 г. участвовал в организации Нижегородской Радиолаборатории и в марте 1919 г. переселился в Н.-Новгород, где до 1925 г. состоял председателем совета Радиолаборатории им. В. И. Ленина и профессором университета.

В 1925 г. был избран профессором физики в I Ленинградском Медицинском институте и переселился в Ленинград. С 1930 г. состоял профессором Ленинградского института инженеров ж.-д. транспорта и заведывал кафедрой физических основ электротехники. В 1933 г. был назначен профессором физики в Военно-Медицинской академии РККА. В последних двух должностях состоял до последнего времени.

В 1934 г. утвержден в степени доктора технических наук.

Опубликовал свыше 50 печатных трудов и около 250 заметок и статей.

Скончался 12 июля 1937 г. в Ленинграде.

Вариации явления Баркгаузена

(Ступенчатое намагничение)[1]

В. К. Лебединский

1. Установка представляет собою горизонтальную деревянную катушку (будем называть ее *A*) длиною 7 cm с диаметром внутренней полости 4 cm, обмотанную в несколько слоев тонкой изолированной медной проволокой. Концы обмотки ведут ко входу лампового усилителя, оканчивающегося репродуктором.

Под катушкой *A* в горизонтальной плоскости вращается стальной прямолинейный магнит длиною 17 cm, приводимый в движение через фрикционную передачу электродвигателем постоянного тока. Скорость вращения магнита 1—2 оборота в секунду.

2. Типичный «храп» явления Баркгаузена (ступенчатое намагничение) происходит при каждом *приближении* магнита к положению, параллельному оси *A*, т. е. 2 раза за каждый полный оборот, если в полости *A* находится прямолинейный кусок тонкой (диаметром 0,5 mm) железной проволоки. Такая проволока, свитая в спираль, не производит эффекта; если эту спираль растягивать, то при достижении некоторого значительного шага спирали мы получаем явление Баркгаузена.

3. Железная проволока, находящаяся в *A*, включается в цепь: а) аккумуляторов, б) динамомашины постоянного тока, в) городского переменного тока.

В случае *а* при токе в 1—2 А «храп» ослабевал, при 3—4 А становился совсем незаметным. Можно думать, что поперечное намагничивание проволоки током позволяло группам элементарных магнитиков, полагаемым в основу объяснения явления Баркгаузена, лишь колебаться при вращении магнита с малой амплитудой в обе стороны от плоскости витков *A;* каждая группа при таком колебании производит э. д. с. лишь в очень малом числе витков.

В случае *б* при прохождении магнита через те положения (близкие к оси *A*), которые вызывали «храп», наблюдатель слышит работу коллектора динамомашины.

В случае *в* слышен низкий тональный звук, соответствующий частоте переменного тока.

Я думаю, что эти звуки, совершенно ненапоминающие «храпа», происходят таким образом: в моменты нулевого тока в случае *в* или наименьшего тока в случае *б* происходит явление Баркгаузена; оно повторяется, следовательно, с частотой работы коллектора при пульсирующем токе от машины постоянного тока и с частотой переменного тока при городском токе; эти повторения наблюдатель воспринимает как звук. Подобное превращение сложного шума при его ритмическом повторении в звук происходит при известном опыте с «колесом Савара», когда зубчатка вращается достаточно быстро, чтобы шум (шуршание), производимый каждым ее зубцом при встрече его с картоном, повторялся с частотой, лежащей в диапазоне нашего звукового восприятия.

4. Звуки, производимые переменным или пульсирующим током, во много раз громче основного «храпа»; они усиливаются с возрастанием этих токов. Но, конечно, при некоторой величине их (в нашем случае 7—9 А) эти звуки вдруг почти пропадают; в этот момент наша железная проволока достигает точки Кюри и ведет себя как проводник из неферромагнитного материала.

Неполное исчезновение звуков при раскалении железной проволоки можно объяснить обычно индукцией на катушку *A* от проволоки, протянутой по ее оси и несущей пульсирующий или переменный ток; эта индукция, разумеется, очень слаба и происходит только в той мере, в какой витки обмотки *A* не лежат в плоскостях, строго перпендикулярных ее оси.

Для ослабления этой индукции, происходящей от движения (изменения) магнитного поля, производимого движущимися электронами, в катушку *A* вкладывалась железная проволока, согнутая петлею, образующая длинное и узкое *П*, обе половины которого были изолированы одна от другой фарфоровым стержнем (3-mm диаметром); при таком устройстве оставалась лишь индукция, происходящая от несовпадения прямого и обратного тока с осью *A*.

5. При наблюдении описанных тональных звуков нет необходимости во вращении магнита, которое применяется при воспроизведении явления Баркгаузена в его классической форме.

Магнит может быть неподвижно установлен в том положении, при котором в классическом опыте производится «храп». Более того, из некоторых деталей наблюдаемых мною явлений мне представилось, что вращение магнита скрывает одно важное обстоятельство, к описанию которого я теперь перехожу.

Предварительно отмечу такое соображение: группы элементарных магнитиков, производя последовательно два противоположных поперечных намагничивания, соответствующих двум половинам «волны» переменного тока, должны повернуться на 180°. Этот поворот одинаково может произойти как в плоскости, перпендикулярной к оси катушки *A*, так и в плоскости, параллельной этой оси. В первом случае поворот этот производит индукцию лишь постольку, поскольку обмотка *A* не представляет собою идеального соленоида; во втором — индукция поворота максимальна. Под «индукцией поворота» я разумею ту, которая производит эффект Баркгаузена и не зависит от ускорения электронов; индукцию обычную я считаю в достаточной мере ослабленной.

6. Эти общие соображения приводят к заключению: если удастся известным положением магнита относительно оси катушки *A* привести повороты

[1] Предварительное сообщение об описываемых ниже опытах опубликовано В. К. Лебединским в «Известиях электропромышленности слабого тока» № 9, 1935, стр. 39.

в плоскость, перпендикулярную оси, звук, наблюденный мною, исчезнет; и, наоборот, он появится, если заставить повороты совершаться в плоскости, параллельной оси *A*.

Оказалось, что это легко сделать: к «звучащей» катушке *A* подносим магнит, держа его ось перпендикулярно оси *A;* наступает молчание. И, наоборот, к «молчащей» катушке *A* подносим магнит с осью параллельной оси *A* — наступает звучание.

Тут полезны следующие примечания: 1) В первом случае можно поднести также и магнит с параллельной осью, но только направленной обратно тому, как она была направлена при наступании звучания; в этом случае нужно, поднося магнит, уловить то расстояние, на котором он уничтожает звучание; при более близком поднесении он снова установит звучание. 2) Магнит с осью, перпендикулярной оси *A*, можно поднести до прикосновения полюсом с катушкой *A*, но к определенной точке по ее длине; отыскав эту точку, мы получим полное молчание. 3) Легкое встряхивание железного бифиляра не повредит превращению явлений, хотя никоим образом необязательно.

7. В этих опытах я пользовался током от лампового генератора низкой частоты и получал звуки с частотою от нескольких сотен до нескольких тысяч герцев.

На опыте оказалось одно совсем непредвиденное обстоятельство: для большей ясности явлений замирания и звучания полезно пропустить через железную петлю, кроме переменного тока, — постоянный (1—2 А).

8. Остается отметить, что, *произведя* замирание или звучание, можно удалить магнит (не поворачивая его, конечно). Как молчание, так и звучание катушки *A* останутся в виде длительного состояния. Это — то важное обстоятельство, которое скрывается при методе вращающегося магнита.

БИБЛИОГРАФИЯ

БЕРТИК И. А. ПУТИ РАЦИОНАЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОСИЛОВОГО ХОЗЯЙСТВА.

На правах рукописи. М., НКТП ГУУЗ. 1937. 69 стр. 21 рис. 2000. 4 р.[1]

Книга предназначена для инженеров и техников, непосредственно работающих по эксплоатации промышленных установок среднего масштаба и по надзору. Она ставит себе целью помочь этим работникам выполнить постановление Совнаркома СССР от 13 октября 1936 г. об экономии электроэнергии.

Книга содержит следующие разделы: I. Рациональные методы эксплоатации электроустановок; II. Методы повышения коэфициента мощности в электроустановках; III. Экономия электрической энергии и борьба с потерями.

Не претендуя на принципиально новые сведения, автор охватывает в книге почти все вопросы, связанные с рационализацией электросилового хозяйства среднего масштаба, и дает по ним практические решения, не касаясь при этом вопросов, относящихся к крупным энергетическим системам.

В книге приводятся числовые примеры и решения техно-экономических задач, таблицы и графики, которые необходимо иметь при правильном ведении электросилового хозяйства; приводятся примеры заполнения таблиц и графиков, а также ряд справочных таблиц.

Освещение вопросов дано достаточно полное для поставленной задачи.

Желательно было бы, однако, пополнить книгу бо́льшим количеством справочных таблиц и др. материалов по вопросам экономии, тарификации электроэнергии и пр. Мало данных по эксплоатации оборудования и еще меньше сведений по монтажу. При техно-экономических подсчетах и сравнениях забыты подсчеты экономии цветных металлов.

Следовало бы также указать на значение выбора местоположения подстанций с точки зрения экономии меди и потерь.

В книге не рассмотрены следующие вопросы: 1) о целесообразности дробления мощности подстанций с целью приближения трансформаторов к приемникам энергии; 2) об использовании резервных синхронных генераторов в качестве компенсаторов и 3) о наивыгоднейшей степени повышения коэфициента мощности с точки зрения экономики как данного предприятия в целом, так и электроснабжающей системы.

Схемы подстанций приведены только с параллельной работой всех силовых трансформаторов и всех осветительных трансформаторов или тех и других вместе. В практике же строительства новых электроустановок в последнее время применяется преимущественно секционная или раздельная работа всех трансформаторов. При этом авария с одним из трансформаторов приводит к отключению только части фидеров, которые питаются от вышедшего трансформатора.

При описании схем подстанций ничего не сказано о трансформаторном резерве для силовых трансформаторов. При наличии только двух трансформаторов, как показано в схемах, потребуется внутритрансформаторный резерв. В противном случае при параллельной работе трансформаторов выключение одного из них вызовет отключение другого вследствие перегрузки или потребуется срочно отключить часть фидеров.

Следует отметить, что в соответствии с правилами техники безопасности необходимо иметь два не связанных между собой источника питания — отдельно для рабочего освещения и отдельно для аварийного освещения (освещение безопасности). Поэтому фидера рабочего и аварийного освещения должны питаться от раздельно работающих трансформаторов.

Расположение материала в книге и соразмерность отдельных частей удовлетворительны. Но книга нуждается в значительной переработке в отношении правильности терминологии, ясности изложения, а также тщательности и четкости оформления. В книге повторяются пояснения отдельных коэфициентов и величина, также имеются неправильные утверждения. Например, на стр. 49 написано, что нагрев ротора при величине постоянного тока в роторе $I_n = I_p \sqrt{2}$ будет такой же, как при асинхронной работе мотора.

Эта формула выражает только условие, что магнитодвижущие силы в определенной фазе ротора будут одинаковы как при синхронизированном режиме, так и при асинхронном.

Количество же тепла, выделяемое в этой фазе, будет при этом вдвое более при питании постоянным током $I_n = I_p \sqrt{2}$, чем при асинхронной работе.

Допустимый ток в роторе определяется по максимальному нагреву наиболее нагруженной фазы.

[1] По материалам библиографического сектора Государственной научной библиотеки НКТП СССР.

Формула $I_n = I_p \sqrt{2}$ (стр. 49) действительна только для схемы, изображенной на рис. 15. С точки зрения нагрева эта схема включения мотора наименее выгодна.

Возможен еще ряд других схем соединения обмоток синхронизированного мотора, о которых автор не говорит.

В частности, необходимо было бы указать о схеме питания ротора мотора постоянным током при включении его обмотки в треугольник.

Кроме того допущено много графических и грамматических ошибок, которые обесценивают работу.

Так например, на рис. 3 (стр. 7) пропущены соединения нулевых точек трансформаторов с нулевой шиной.

Во 2-м уравнении на стр. 63 сделано 3 ошибки.

На стр. 37 указано, что предприятие работает 14 часов в сутки, а в формуле расхода энергии (на 4 строке снизу) принята работа 21 час. Эти и целый ряд других ошибок обесценивают числовые примеры.

Вследствие большого количества допущенных в книге ошибок и описок в формулах, подсчетах и тексте — книгой пользоваться без переработки затруднительно. Небрежное издание книги должно естественно возбудить у читающего сомнение в правильности материала, помещенного в книге. Особенно это касается справочных материалов, формул, таблиц.

К сожалению, автор за небольшим исключением даже не указал источники, откуда им взяты таблицы и пр. Поэтому весьма трудно проверить соответствующие справочные сведения, их правильность и новизну.

После переработки с учетом этих замечаний рецензируемая книга может служить пособием инженерно-техническому персоналу, работающему по рационализации электросилового хозяйства.

В. И. Вертебный
Главэлектропром

ВАЙНЕЛ Д. В. АККУМУЛЯТОРНЫЕ БАТАРЕИ. М.—Л. ОНТИ. Главная редакция энергетической лит-ры. 1937. 400 стр. 160 рис. 2000. 7 р. 50 к.[1]

Электрические аккумуляторы в течение последних 12—15 лет получили необычайно широкое распространение. Можно с полной уверенностью сказать, что в Советском Союзе нет сейчас такого уголка, где бы ни применялся этот источник электроэнергии.

Вполне понятен поэтому повышенный интерес к книгам, посвященным аккумуляторным батареям. Однако надо сознаться, что отечественная литература крайне бедна трудами по данному вопросу. Особенно остро ощущается недостаток в изданиях для квалифицированных читателей. Довольно обширному кругу специалистов, работающих в области аккумуляторной техники, могла быть предложена единственная, переведенная на русский язык в 1934 г. книга Долецалека «Теория свинцового аккумулятора», изданная еще в 1901 г. Но эта работа сугубо теоретического характера не в состоянии удовлетворить запросы практики нашего времени.

Таким образом перевод книги Д. В. Вайнела, занимающей очень видное место в мировой технической литературе, является давно назревшей необходимостью.

Доктор Д. В. Вайнел, главный физик Бюро стандартов Министерства финансов США, один из крупнейших специалистов в области теории и практики аккумуляторного дела, создал книгу, содержание которой можно характеризовать как объединение курса теории электрических аккумуляторов со сведениями производственного и эксплоатационного характера.

Несмотря на сравнительно небольшой объем, труд Вайнела с достаточной полнотой охватывает теоретическую и практическую стороны аккумуляторной техники, содержит ряд нужных и ценных сведений, полезных всем соприкасающимся с данной отраслью промышленности. Во многих разделах книги автор приводит теоретические моменты с параллельной иллюстрацией их экспериментальными данными и примерами, что делает изложение особенно убедительным и понятным.

Благодаря компактности и ясности изложения книга доступна самому широкому кругу инженерно-технических работников, и в то же время специалист-аккумуляторщик найдет в ней немало нужного справочного материала.

Во второй главе дается краткий очерк развития кислотных и щелочных аккумуляторов, описываются материалы, применяющиеся для пластин, баков, сепараторов и т. д. Приводятся некоторые, к сожалению, слишком схематичные и сжатые сведения о методах производства элементов свинцового и щелочного типа.

Свыше пятидесяти страниц (глава III) отведено электролитам (растворам серной кислоты и едкого кали). Здесь читатель найдет много важного, практически ценного материала.

Современным теориям процессов, происходящих в аккумуляторах, посвящена четвертая глава. Анализируя работы многочисленных исследователей, изучивших явления, протекающие внутри свинцового элемента, и ссылаясь на собственные опыты, автор подтверждает правильность классической теории двойной сульфатации.

Теории щелочных аккумуляторов отведено более скромное место.

Емкость, внутреннее сопротивление и отдача рассматриваются в главах V, VII и VIII, причем наиболее детально разбирается емкость, важнейшая величина, характеризующая тот или иной аккумулятор. Подробно изучены факторы, определяющие емкость и методы ее нормирования. Приведено много интересных данных и таблиц, впервые публикуемых на русском языке.

Глава шестая посвящена вопросам эксплоатации (зарядка, зарядные устройства, разборка и сборка элементов, повреждения и т. п.). Особенно подробно разобраны все существующие методы заряда. Текст иллюстрирован большим числом таблиц и графиком, из которых значительный интерес представляет фиг. 74 (стр. 236) — сравнение методов заряда при постоянной силе тока и при постоянном потенциале.

В главе девятой разбираются методы испытания элементов и батарей разных типов на емкость, срок службы, чистоту электролита и т. д.

В заключительной (десятой) главе рассматриваются главнейшие применения аккумуляторов. Наибольшее место отведено автомобильным (стартерным) и тяговым батареям, получившим в США чрезвычайно широкое распространение[2]. Значительно слабее разработаны параграфы, посвященные стационарным установкам (центральные электрические станции, телефонные и телеграфные централи, СЦБ и т. д.).

В конце каждой главы помещен небольшой библиографический указатель, кроме того, имеется значительное количество подстрочных ссылок.

При всех своих неоспоримых достоинствах книга Вайнела не вполне свободна от недостатков.

К ним следует отнести некоторую односторонность изложения. Весь практический материал построен почти исключительно на американских данных, причем большая часть текста отведена аккумуляторам намазного (пастированного) типа. Элементы из пластин с развитой поверхностью освещены недостаточно. Совершенно выпал из поля зрения автора никель-кадмиевый элемент (Юнгнера), который приобрел право повсеместного гражданства наравне с системой никель-железо (Эдисон).

Расположение материала несколько своеобразно и может вызвать возражения. Теорию электрохимических процессов полезно было бы рассматривать до описания методов производства и формирования, так как последние требуют знакомства с явлениями электролиза и пр. Описание электрических свойств — емкость, сопротивление и отдачу, хорошо было бы не разделять главой об эксплоатации.

Вопросы неисправностей разработаны весьма неравномерно. Так, например, неисправности, происшедшие от неудовлетворительного качества электролиза, освещены чрез-

[1] По материалам библиографического сектора Гос. научной библиотеки НКТП СССР.

[2] К началу 1937 г. в США число находящихся в эксплоатации стартерных батарей превышало 28 млн. шт.

вычайно подробно и даже не в одной, а в двух главах (III и IV), вопросы короткого замыкания и т. д. изложены на нескольких строках.

Второе американское издание печаталось в конце 1929 г., когда практическая ценность микропористых сепараторов выявилась вполне достаточно. Однако им уделено всего пять слов (страница перевода 53). Точно так же не привлекли внимания автора сепараторы из стеклянных волокон, уже с успехом применявшиеся в то время в тяговых батареях Гоульда (Gould).

В главе третьей в разделе о методах изготовления электролита определенной плотности не указано очень простое и часто используемое «правило креста» Кобленца.

Переходя к рассмотрению русского перевода, следует отметить, что редактор, очевидно, желая избежать каких-либо отступлений от текста оригинала, не позволял себе делать никаких изменений и дополнений в переводе. Исключение составляют некоторые ОСТ и технические условия на советское сырье, добавленные редактором, а равно список типов аккумуляторов, изготовляемых в СССР, помещенный в конце книги отдельным приложением.

Это стремление быть как можно ближе к подлиннику едва ли соответствует интересам советского читателя.

Учитывая значительное усовершенствование технологического процесса и исключительно быстрое развитие аккумуляторной техники в течение 7 лет, истекших с момента выпуска американского издания, нужно указать, что книга в некоторой части отстала от современности и нуждается в дополнениях. Следовало ознакомить читателей с достижениями нашей аккумуляторной промышленности.

Совершенно необходимо познакомить читателя, например, с порошковой пастой, применение которой значительно улучшило эксплоатационные качества намазных аккумуляторов. Большой интерес представляют упоминавшиеся выше микропористые сепараторы и диафрагмы из стеклянного войлока, получившие в течение последних лет общее признание.

Вполне целесообразно было бы заменить устаревшие американские стандарты более современными. Последний стандарт (W.-B-131a от 18 декабря 1935 г.) предъявляет значительно более жесткие требования к испытаниям стартерных батарей на холоду (см. статью Н. Ламтева «Новейшие автомобильные аккумуляторы» в журнале «Техника и вооружение» № 11, 1936). То же относится к межэлементным соединениям (стр. 317 русского перевода). Табл. 53 (стр. 323) не дает представления о применяемых в настоящее время батареях. Данные нового американского стандарта принесли бы значительную пользу.

Прямой обязанностью редактора было указать, что в СССР применение ареометров, градуированных в градусах Боме, воспрещено с 1 июля 1934 г.

Редактор мог расширить список литературы, указав наиболее интересные новые книги и журнальные статьи, появившиеся в течение 1930—1936 гг. в нашем Союзе и за рубежом.

В переводе очень часто встречаются наименования, не принятые в СССР. Например, общеизвестные стартерные (ОСТ 7873) батареи в большей части книги называются «пусковыми и осветительными», «автомобильными» и сравнительно редко «стартерными».

Тяговые аккумуляторы получили название «автомобильных типов» (стр. 180), «автомобильно-тяговых типов» (стр. 231) и в некоторых случаях — «тяговых».

Известные всем электрокары или электротележки названы «электровагонетками» (стр. 12), просто «вагонетками» (стр. 78), «грузовыми тележками» (стр. 224), «промышленными электрическими вагонетками» и т. д.

Такое разнообразие наименований, без сомнения, не только затрудняет чтение, но дает неправильную ориентировку в терминологии.

Некоторые места перевода требуют исправления. В начале первой (вводной) главы в оригинале говорится, что аккумулятор является электрохимическим (electrochemical) прибором — в переводе значится: электрическим прибором (стр. 11).

В абзаце о первых аккумуляторных установках (стр. 12) «trolley service at Dover in 1893» переведено: «электровагонетки в Довере». Там же при переводе «Central Station telephone service at Chicago» пропущено «telephone», в результате чего получилось новое, неправильное понятие. «Ignition» переводится как «запал» (стр. 332) вместо принятого термина «зажигание».

К сожалению, не все размерности именованных величин, приведенные в подлиннике в дюймах, футах и милях, переведены в метрические меры (рис. 142, 145).

Издана книга довольно небрежно. Многие, особенно тоновые клише неясны (рис. 8, 20, 27, 35, 114, 130 и др.).

Список опечаток далеко не полон.

Несмотря на отмеченные недостатки, русский перевод книги Вайнела следует всемерно приветствовать. Он окажет помощь своим богатым содержанием всем занимающимся вопросами аккумуляторного дела.

При последующем издании, которое, надо надеяться, не заставит себя ждать, так как тираж (2000 экз.) явно недостаточен, недочеты должны быть обязательно выправлены, книга тщательно отредактирована и выпущена в хорошем оформлении.

Н. Ламтев

НОВЫЕ КНИГИ

Буйлов А. Я. и Малевинский Б. М. Методы усиления масляных выключателей. М.—Л., Главн. ред. энергетической лит-ры, 1938, 88 стр. с иллюстр., ц. 1 р 75 к.

В книге приведены доказательства рациональности и рентабельности реконструкции и модернизации старых масляных выключателей. Даны методы и расчеты производства такого рода работ для усиления выключателей на напряжение как ниже, так и выше 35 kV. Указаны способы, нормы и схемы испытания выключателей.

Васильев А. А., инж. Коммутация понизительных подстанций большой мощности. Вып. 2. М. Энергетический факультет МЭИ, 1938, 58 стр. с черт., ц. 1 руб.

В книге рассматриваются вопросы выбора трансформаторов и коммутации понизительных подстанций большой мощности в сетях с напряжением 220, 110 и 35 kV, предназначенных для электроснабжения районов, городов и крупных промышленных предприятий.

Гутенмахер Л. И. Синхронизационные устройства электрических станций. Харьков, Гос. научно-технич. изд. Украины, 1938, 291 стр. с иллюстр., ц. 6 руб., перепл. 1 р. 50 к.

В книге систематизированы материалы по синхронизационным установкам. Автор рассматривает основные принципы работы синхронизаторов, применяемых для автоматического включения синхронных генераторов на параллельную работу. Вместе с этим автор дает критику существующих конструкций синхронизационных устройств и кратко излагает собственные решения задач, выдвигаемых практикой эксплоатации электростанций.

Дроздов Н. Г., инж. Электричество трения как причина взрывов и пожаров. М.—Л., Главн. ред. энергетической лит-ры, 1938, 78 стр. с иллюстр., ц. 1 р. 85 к.

Автор дает изложение технологических процессов работы машины и аппаратов, где могут образовываться заряды, случаи взрыва от пыли, от разрядов статического электричества и меры их предупреждения.

Ильинский В. И., инж.-электр. Электродвигательный привод в доменном производстве. Под ред. проф. Т. П. Губенко. Харьков, Гос. научно-технич. изд-во Украины, 1938, 384 стр. с иллюстр., ц. 8 р. 50 к., перепл. 1 руб.

Описанию привода предпослан краткий разбор технологического процесса и основных механизмов агломерационной фабрики, коксового завода и механизмов для транспорта — материалов на рудный двор и к бункерам доменного цеха. При разборке управления электроприводами наибольшее внимание уделено схемам автоматического управления.

Инструкции по уходу и эксплоатации трамвайных электродвигателей. М.—Л., НКТП. Гос. контора справочников и каталогов, 1937, 48 стр. с иллюстр., ц. 2 руб.

Лапицкий В. И., доц. Методика составления технико-экономического проекта энергетической системы (Краткое учебное руководство). М., Московский энергетический институт, 1937, 157 стр., без цены.

Книга представляет собой программу курсового проекта энергосистемы, состоящую из следующих заданий: 1. Общая концепция проектируемой системы. 2. Расходная часть энергобаланса. 3. Энергоресурсы района системы. 4. Ремонтный план. 5. Производственный план. 6. Себестоимость продукции системы. 7. Расчет сети системы.

Латманизов М. В., Ломоносова Л. А., Паль Е. А. и др. Задачник по синхронным машинам. Вып. 1. Л., Ленинградский индустриальный институт, 1937, 256 стр. с чертеж., без цены.

Марков А. К. Руководство по уходу за электрической проводкой и электрическими нагревательными приборами. 2 изд. М.—Л., Главн. ред. энергетической лит-ры, 64 стр. с иллюстр., ц. 1 р. 25 к.

Мясников Л. Л. Акустические измерения. Утверждено ГУУЗ НКТП СССР в качестве учебного пособия для втузов. Л.—М., Главн. ред. энергетической лит-ры, 1937, 132 стр. с иллюстр., ц. 2 руб.

Книга содержит изложение принципов и методов акустических измерений, относящихся к электроакустической аппаратуре, распространению звука в замкнутых помещениях и открытом пространстве, а также к вопросам записи и анализа звука.

Назаров Г. И. Электропривод в сельском хозяйстве. Главн. управлением вузов и техникумов НКЗ СССР допущено в качестве учебника для факультетов и институтов механизации социалистического сельского хозяйства. Под ред. проф. М. Г. Евреинова. М., Сельхозгиз, 1936, 256 стр. с иллюстр., ц. 4 р. 10 к.

В курсе дается знакомство с электромотором в неразрывной связи его с рабочей машиной. Даны электромеханические характеристики моторов постоянного и переменного тока, методы определения мощности и типа двигателя для различных рабочих машин и схемы и аппараты для управления электродвигателями.

Правила безопасности при работах на сельскохозяйственных электроустановках. М., изд-во Наркомзема СССР, 1937, 75 стр. с иллюстр., беспл.

Руцкий А. И., инж. Термический эффект токов короткого замыкания в элементах распределительных устройств. М., изд-во Белорусского Гос. политехнического института, 1937, 80 стр. с диагр., ц. 1 р. 25 к.

Задачей работы является исследование термического действия токов короткого замыкания на токоведущие части элементов распределительных устройств — шины, провода, кабели. Исследование включает разработку практического метода расчета, основанного на учете влияния различных факторов на нагрев, и критику существующих методов расчета.

Совол. Новая негорючая изолирующая жидкость. Состав.: К. А. Андрианов, Ч. Д. Гартон и др. Под ред. К. А. Андрианова и Ф. А. Квитнера. М.—Л., Главн. ред. энергетической лит-ры, 1937, 112 стр. с диагр., ц. 2 руб.

В книге представлен материал, касающийся разработки способа получения и исследования нового продукта совола. Описаны его свойства — гигроскопичность и термостойкость, электрическая прочность. Указаны области применения совола. Одновременно с напечатанием работы совол выпущен как промышленный продукт на советском заводе из советского сырья.

Перов Н. М. Электрическая централизация стрелок и сигналов. Ч. IV, М., Трансжелдориздат, 1938, 207 стр. с иллюстр., ц. 4 р. 50 к.

Книга дает общее понятие об электрической централизации, методику расчета аккумуляторных батарей, связи электрической централизации с автоматической и полуавтоматической блокировкой, схемы электросигнализации и сведения монтажного характера.

Пиотровский Л. М., Попов В. К., Гохберг С. М. и Паль Е. А. Испытание синхронных машин. Л., Ленинградский индустриальный институт, 1937, 307 стр. с чертеж., без цены.

Это стеклографированное издание содержит: Определение применения напряжения в синхронных машинах. Описание параллельной работы их. Исследование синхронного двигателя. Параметры синхронных машин. Внезапное короткое замыкание. Определение к. п. д. и способы измерения мощности в трехфазной цепи.

Правила безопасности и правила устройства для электротехнических сооружений сильного тока низкого и высокого напряжения. Сост. инж. Л. П. Подольский. Изд. 4, переработ. и дополн., М.—Л., Главн. ред. энергетической лит-ры, 1937, 384 стр. с иллюстр., ц. 5 р. 25 к., перепл. 75 коп.

Помимо пояснений к правилам ВЭС и уточнениям в них, внесенных Комиссией Главэнерго в 1932 г., автор вводит две новые главы «Заземления и зануления в установках до 1000 V» и «Защита проводов и кабелей».

Труды Ленинградского электротехнического института инженеров сигнализации и связи. Вып. 1, под. ред. акад. В. Ф. Миткевича, проф. Е. Ф. Комаркова, В. Н. Листова и инж. И. И. Иванова. М., Трансжелдориздат, 1937, 159 стр. с иллюстр., ц. 4 руб.

Выпуск содержит двенадцать статей нескольких авторов. В них описывается новый способ измерения сопротивления угольного микрофона в динамическом состоянии, АТС системы R6, теория двухэлементного реле, закон Вебера, применение гипотезы Рейс к скользящим функционным передачам и ряд других.

Чиженко С. А. Практическое руководство по вагонному электроосвещению. М., Трансжелдориздат, 1938, 173 стр. с иллюстр., ц. 3 руб.

Письмо в редакцию

Уважаемый товарищ редактор!

Прошу не отказать поместить в журнале следующее.

В выпущенной ОНТИ в феврале 1938 г. моей книге «Переходные процессы и перенапряжения в электрических цепях» мною после выхода книги обнаружена ошибка, случайно просмотренная в рукописи и при корректуре.

Так как эта ошибка, хотя и не имеет принципиального значения, но может вызвать недоразумения при пользовании книгой, я считаю необходимым довести до сведения читателей о необходимости следующего исправления.

На стр. 258 текст, начиная с 9 строчки сверху, должен быть изменен на следующий:

$$E_{0m} = 2at_s.$$

Отношение амплитуд напряжений в точках 0 и A будет:

при $2t_0 > t_s$

$$\frac{E_{0m}}{E'_{am}} = 2 \qquad (545)$$

и при $2t_0 < t_s$

$$\frac{E_{0m}}{E''_{am}} = \frac{t_s}{t_s - t_0} < 2. \qquad (546)$$

Дальнейший текст остается без изменений, и приведенные далее в книге выводы из уравнений (545) и (546) остаются в силе. Однако в связи с изменением уравнений (545) и (546) кривая рис. 222 на стр. 258 требует соответствующего изменения.

Л. Е. Машкиллейсон

РЕФЕРАТЫ

HRUSCHKA. ВОПРОСЫ ЭКОНОМИИ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ НА МЕЖДУНАРОДНОМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ КОНГРЕССЕ. Е и М № 52, 1937, 26 декабря, стр. 634—637

На международном ж.-д. конгрессе, состоявшемся осенью 1937 г. в Париже, был заслушан ряд докладов о современном состоянии энергоснабжения электрических ж. д. в различных странах и о мероприятиях по экономии энергии, расходуемой на тягу поездов.

Подстанции. Недогрузка подстанций была отмечена как фактор, повышающий потери на преобразование энергии. Отношение установленной мощности подстанции к среднегодовой нагрузке равно на австрийских ж. д. 1,8—2,3; на германских — 2,3; на швейцарских — 2; на шведских — 2,17—2,27; на японских — 1,78—2,7. Приведенные цифры говорят о недостаточной загрузке подстанций, что лишний раз иллюстрирует одну из главных характерных черт общего кризиса капиталистического хозяйства — хроническую недогрузку производственного аппарата.

Потери энергии в питающих линиях передачи на электрических ж. д. постоянного тока колеблются от 1,5 до 9,6%, для однофазных ж. д. от 1,9 до 10%. Повышение потерь при однофазных ж. д. объясняется бо́льшими реактивными токами.

Допустимая потеря напряжения на первичной стороне тяговых подстанций составляет для электрических ж. д. постоянного тока 13% длительно и 21% кратковременно; для однофазных ж. д. — соответственно 10 и 20%.

Расстояние между подстанциями на ж. д. постоянного тока дано в таблице.

Таблица 1

Напряжение в контактном проводе V	Расстояние между подстанциями в km		
	наименьшее	среднее	наибольшее
600—650	3,38	5,74	7,4
800—825	7,4	9,33	11,25
1200	—	11,26	—
1500	7,25	13,67	19,8
3000	—	22,53	—

Расстояние между подстанциями однофазных ж. д., питаемых без отсасывающих трансформаторов, колеблется от 20 до 135 km, при питании с отсасывающими трансформаторами оно значительно больше. Расстояние между отсасывающими трансформаторами достигает до 13 km.

Замена вращающихся преобразователей мутаторами — наиболее эффективный способ увеличить к. п. д. тяговых подстанций постоянного тока. Современный мутатор имеет автоматическое управление охлаждением и вакуумом, надежную защиту от обратных зажиганий и сеточное регулирование напряжения в пределах 4—6%. На подстанциях однофазных ж. д. большой эффект дает установка высоковольтных статических конденсаторов. Автоматическое и дистанционное управление подстанциями, применяемое на всех новых подстанциях, не требует увеличения резервов и повышает среднегодовой к. п. д. за счет улучшения средней загрузки агрегатов.

Коэфициент полезного действия всех мотор-генераторных подстанций шведских ж. д. в течение 1936 г. был 83,2% (преобразование трехфазного 50-Hz тока в однофазный $16^2/_3$ Hz), среднегодовой к. п. д. выпрямительных подстанций 92—96,4%, средний к. п. д. всей системы энергоснабжения от шин центральной станции до шин низшего напряжения подстанций от 79,2 до 83,7%. Коэфициент мощности на дорогах постоянного тока держится в пределах 0,9—0,96%, на однофазных — 0,7—0,9%.

Следует отметить, что вопросы рекуперации энергии на ртутных выпрямителях получили практическое разрешение и подтвердили надежность работы мутаторов при рекуперации.

Контактная сеть. Для напряжений до 850 V целесообразнее всего применять подвод тока через третий рельс. Применяются третьи рельсы различных сечений весом от 42 до 75 kg/m с медными стыковыми соединениями сечением 216—900 mm². Наилучший результат дает стальной третий рельс с содержанием углерода 0,09%; марганца 0,42%; серы 0,05%; кремния 0,09%; фосфора 0,03%. Удельная проводимость такого материала в 8 раз меньше проводимости меди.

Для напряжений постоянного тока выше 850 V почти исключительно применяется верхний контактный провод. Сечение проводов над одним путем колеблется в пределах 450—650 mm², наибольшее значение — 1800 mm², меди над одним путем. По данным инж. Файрборн (Англия) на ж. д. постоянного тока 1500 V сечение проводов над одним путем 160—225 mm², иногда до 900 mm², при напряжении 3000 V от 258 до 830 mm².

На ж. д. однофазного тока суммарное сечение контактной сети 100—167 mm², изредка до 220 mm².

На ж. д. постоянного тока применяются стыковые соединения из медного троса, привариваемые к головке или к подошве рельса; соединения под накладкой теперь не применяются. Поперечные междуниточные соединения при автоблокировке ставятся в дроссельных стыках, при отсутствии автоблокировки расстояние между поперечными соединениями принималось 40—250 m при 1500 V в контактном проводе и 100—250 m при 3000 V. Новейшие участки электрических ж. д. раздвигают междуниточные соединения на 1000 m и более [до 3500 m в Японии (1500 V) и до 2000 m на пригородных ж. д. Варшавского узла (3000 V)]. Отсасывающие провода применяются как редкое исключение сечением до 966 mm².

На однофазных ж. д. стыковые соединения применяются только в сырых туннелях, поперечные междуниточные соединения устанавливались ранее через 100—300 m, в настоящее время через 1 km (Венгрия) и даже 3 km (Австрия). Кроме того, поперечные междурельсовые соединения устанавливаются по концам вокзальных путей.

Только в Швеции используются отсасывающие трансформаторы, расстояние между которыми в среднем 5 km, наибольшее до 13 km.

Суммарные потери энергии в контактной сети постоянного тока 650—850 V — 3—10%; 1200—1500 V — 7,5—17,5%; 3000 V — 6—10%. При однофазном токе около 1%, по опыту Америки, 3% в Германии и 6% в Австрии.

Подвижной состав. Последние годы характеризуются значительным повышением абсолютной и удельной мощности электровозов. Так, по электровозам однофазного тока имеем:

Год постройки	Л. с.	Кг/л. с. часовой мощности	
1912	500—700	100—140	
1920	1000—2000	60—85	
1937	2000—6600	40—26	пассажирские
		55—35	товарные

Коэфициент сцепления при часовом токе колеблется от 1 : 3,3 до 1 : 5,5. Наибольший коэфициент сцепления дают электровозы Америки и Швейцарии. На новейших электровозах однофазного тока применяется индивидуальный привод; групповой привод для однотипности сохранен лишь на новейших электровозах Швеции и Норвегии. Переход на индивидуальный привод позволил безопасно для пути увеличить нагрузку на ось; в Швейцарии на новых электровозах нагрузка на ось увеличена с 20 до 21,5 t.

Повсеместно на новых электровозах как постоянного, так и однофазного тока увеличено число пусковых ступеней для осуществления плавного пуска.

В отличие от электровозов конструкция моторвагонного подвижного состава имеет большое влияние на расход энергии. Снижения удельного расхода энергии можно добиться уменьшением веса моторных вагонов, что достигается применением сварки и, где возможно, легких металлов. Уменьшение веса электрооборудования достигается повышением быстроходности тяговых двигателей часто до 1520 об/мин при часовом токе. О том, насколько можно уменьшить вес моторвагонов этими мерами, показывает пример Америки, где новые моторвагоны легкой конструк-

ции на 45% легче старых моторвагонов на то же число мест. Подсчет инж. Файрборн показывает, что при среднегодовом пробеге 80,5 тыс. km и удельном расходе энергии 61,4 Wh/tkm увеличение тары вагона на 1 t вызывает повышение годового расхода энергии на шинах подстанции на 4900 kWh; переход на облегченный подвижной состав, кроме того, уменьшает необходимые затраты по сети и подстанциям.

Роликовые подшипники значительно способствуют экономии энергии, так как применение их на подвижном составе снижает удельное сопротивление движению на 5—10%.

Современные моторвагоны имеют обычную трамвайную подвеску тяговых двигателей (привод Спрэга), для скоростных вагонов применяется привод через пустотелый вал. Начинают применять также двухкратную зубчатую передачу. Число пусковых реостатных ступеней на большинстве вагонов равно 16.

Отопление поездов на всех электрических ж. д. производится электричеством ввиду дешевизны и надежности электрического отопления. Расход энергии на отопление колеблется от 2 до 15% суммарного годового расхода энергии в зависимости от климата (Германия — 9,2%, Швейцария — 9%, Швеция — 10%, Америка — 4—10%, ж. д. Берн — Лечберг — Симплон — 15%). Применение термостатов, регулирующих температуру воздуха в вагонах, снижает расход энергии на отопление.

Рекуперация энергии вполне целесообразна при наличии 10‰ уклонов (на ж. д. Венгрии она оправдалась и на 4‰ уклонах). Вес электровозов постоянного тока, оборудованных для рекуперации, увеличивается на 4%, вес однофазных электровозов при рекуперации по схеме Эрликона на коллекторных двигателях практически не увеличивается, но коэфициент мощности падает до 0,5. На ж. д. постоянного тока достигнута экономия энергии: в 50—55% — Великая Индостанская (Great Indian Peninsula Rwy) ж. д. на товарных поездах при уклонах 10—27‰, японские ж. д. — 30% при уклонах 10—27‰, Южноафриканские ж. д.—6% при уклонах 35‰. На однофазных ж. д. Швейцарии—25% при уклонах 26—45‰, на моторных вагонах Германии—16%.

Признано также целесообразным применять премирование электровозных машинистов за экономию энергии.

Приведенные на международном ж. д. конгрессе соображения об экономии энергии имеют для нас определенный интерес.

Эти соображения должны быть, разумеется, подвергнуты критическому анализу под углом зрения условий социалистического планового хозяйства нашей страны.

Экономия энергии, расходуемой на электроснабжение электрических ж. д. СССР, является неотъемлемой частью общей задачи экономии энергии в народном хозяйстве Союза, задачи, выдвинутой известными постановлениями правительства и особо подчеркнутой решениями Всесоюзного совещания энергетиков в марте 1938 г., а также приказами по НКТП тов. Л. М. Кагановича.

В. А. Соловьев

РТУТНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ. GEC Journal, февраль 1938, стр. 8

Представляют интерес работы, сделанные английской фирмой GEC в области постройки ртутных выпрямителей в 1937 г. Завод, находящийся в Witton, строит выпрямители без насосов (отпаянные). Эти выпрямители выполняются как с водяным охлаждением, так и с воздушным и снабжаются управляющими сетками.

За 1937 г. фирмой построены отпаянные выпрямители с воздушным охлаждением на силу тока от 350 до 750 A и для напряжений до 800 V. Имеются также отдельные экземпляры, выполненные на 1000 kW в единице для 1500 и 3000 V. Выпрямители с водяным охлаждением (также отпаянные) построены с шестью и двенадцатью анодами на силу тока до 1000 A и для напряжений до 4000 V.

Помимо нужд электрической тяги, выпрямители производились в 1937 г. для различных областей хозяйства не только Великобритании, но и для Австралии, Индии и др.

Л. М. Клячкин

РТУТНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ. AEG-M. H. 1, 1938, стр. 8 и BBC-M № 1/2, 1938, стр. 16

В настоящем реферате приводятся данные о работе, проделанной в области ртутных выпрямителей в 1937 г. фирмами AEG и BBC. Капиталистические страны, и в первую очередь фашистские агрессоры — Германия, Италия и Япония, в связи с лихорадочными приготовлениями к большой войне и в связи с уже ведущимися ими войнами спешно снабжают свои заводы мощным энергетическим оборудованием. Особенно бурно растут химическая промышленность и цветная металлургия.

В 1937 г. фирмой AEG для электролиза алюминия выполнена установка на 80 000 A 800 V, состоящая из 16 крупных выпрямителей по 5000 A каждый и 8 трансформаторов, служащих для питания выпрямителей. Кроме этой установки, находящейся уже в эксплоатации, принят заказ на установку на 40 000 A 830 V.

Выполненный для Японии выпрямитель на 6000 A 500 V пущен в эксплоатацию, и принят заказ на установку в 30 000 A 620 V.

Интересно отметить установку, выполненную для преобразования частоты: для этой цели установлены два выпрямителя, преобразующие 45 000 V (50 Hz трехфазного тока в однофазный напряжением 16 000 V), 16⅔ Hz.

Успехи, сделанные в области управляющих выпрямителей, дали возможность применить их в металлургии, в прокатных установках. Одна из этих установок выполнена так, что два выпрямителя, включенные восьмеркой, работая попеременно, то в качестве выпрямителя, то преобразователем из постоянного в переменный ток, служат для питания прокатного стана. Все установки на большую мощность выполнены по 12-фазной схеме включения. За последние годы по этой схеме выполнено установок на общую сумму более 200 000 kW.

Фирмой Brown Boveri за 1937 г. выполнено много установок со ртутными выпрямителями большой мощности, главным образом, для электрохимии и цветной металлургии (алюминий, цинк и др.). Всего за прошедший год выполнено 76 выпрямителей на большую силу тока (5000 A) общей мощностью в 238 000 kW. Бо́льшая часть этих выпрямителей изготовлена для получения алюминия электролитическим путем. Опыт эксплоатации установок с ртутными выпрямителями на одном из заводов алюминиевой промышленности в Швейцарии показал, что выпрямители являются наиболее надежным и экономичным преобразователем электрической энергии переменного тока в постоянный, и в настоящее время фирма экспортирует выпрямители не только в страны Европы, но и в Америку. Значительное число выпрямителей выполнено для алюминиевой промышленности Канады и Северной Америки. Для Канады был получен заказ на 54 500 kW (94 700 A 575 V) и другой крупный заказ на 90 000 kW (150 000 A 600 V) для фирмы Alis chalmers Manufacturing. Кроме того, для электролиза воды были поставлены также крупные агрегаты.

Италия также получила для расширения своей алюминиевой промышленности большое число ртутных выпрямителей всего на общую сумму 40 000 A 600 V, что повысило установку до 75 000 A 600 V. Французские заводы фирмы Alais Froges et Comargue также расширили свои установки для электролиза алюминия за счет ввода в эксплоатацию нового числа агрегатов с ртутными выпрямителями.

Все указанные установки выполнены с регулировкой напряжения помощью управляющих сеток и ступенями на трансформаторе.

Помимо выпрямителей большой мощности, для электролиза фирмой BBC выполнено большое число выпрямителей для тяговых установок: сделаны поставки для метро в Аргентине (Буэнос-Айрес), Парижа и целый ряд трамвайных и железнодорожных установок.

Интересно также отметить, что за прошедший год выполнено 14 выпрямителей для радиотелеграфии для напряжений на стороне выпрямленного тока от 6000 до 20 000 V. Эти поставки сделаны для различных стран: Чехословакия, Турция, Англия (Лондон) и др. Выпрямители и в этом случае снабжены управляющими сетками. Некоторые из высоковольтных выпрямителей для напряжения до 12 kV выполнены с воздушным охлаждением, что значительно упрощает установку и удешевляет эксплоатацию.

Л. М. Клячкин

H. G. GRIFFITH. РАСШИРЕНИЕ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ ПЕНСИЛЬВАНСКОЙ Ж. Д. Railway Electrical Engineer, январь 1938, стр. 1—7

В связи с удовлетворительными результатами работы электрифицированного на однофазном токе участка Пенсильванской ж. д. от Нью-Йорка до Вашингтона поставлен вопрос о необходимости электрификации еще более 500 km линий (1240 km одиночного пути).

Электрификация новых участков принята к выполнению по той же системе однофазного тока 11 000 V 25 Hz с контактным проводом, смонтированным по системе цепной подвески. Двухпроводная линия передач напряжением 132 000 V укреплена на опорах контактной сети. Опоры Н-образного сечения снабжены оттяжками и несут на себе гибкую поперечную подвеску. Фундамент их представляет собой колодец из металлической трубы, заполненный бетоном. Помимо гибкой подвески, на некоторых участках использована подвеска провода на жестких поперечинах и на консолях.

Система подвески состоит из 107-mm бронзового троллейного провода, поддерживаемого медным тросом (со стальным сердечником), увеличивающим проводимость контактной сети. Подвеска над каждым из главных путей электрически независима от проводов других путей и соединяется с ними только через выключатели на шинах подстанций. Контактная линия имеет поперечное секционирование.

Для линии передач использован или алюминиевый трос со стальным сердечником сечением 240 mm² или пустотелый медный трос сечением 127 mm² (250 000 circ mils).

На участках строится 21 понизительная трансформаторная подстанция. Трансформаторы установлены продолжительной мощностью 4500 kVA и подсоединены к линии передачи только через разъединители с роговыми промежутками без выключателей. Наоборот, 11 000-V сторона трансформатора подсоединена к подстанционным шинам через выключатель; шины разделены на две секции для секционирования контактного провода. Каждая секция питается отдельно через быстродействующие выключатели, которые при установке их на 1500 A разрывают ток к. з. в 0,04 sec. Всего будет установлено до 500 быстродействующих выключателей; отличительной чертой их является то, что они содержат мало или совсем не содержат масла, что упрощает уход за ними и уменьшает опасность пожара при авариях.

В отличие от прежнего управления подстанциями из ближайшего блокпоста, на новом участке будет применено центральное диспетчерское управление, которое включает не только дальнеуправление, но и дальнеизмерение. В данном случае система управления применена двухпроводная, кодового типа, каждая подстанция работает от отдельной пары проводов. Приборы, расположенные на панелях в диспетчерском пункте, дают возможность наблюдать за: 1) 11 000-V напряжением на шинах подстанции, 2) 125-V напряжением подстанционной батареи, 3) 25-Hz током силового трансформатора и 4) напряжением подстанционной батареи, установленной для дальнего наблюдения.

Особое внимание будет уделено сигнализации. Поскольку по рельсовым цепям будут протекать не только сигнальные токи, но и электротяговые, система сигнализации выбрана такой, чтобы избежать влияния на нее тяговых токов.

В настоящее время одобрена универсальная кодовая система сигнализации. Ранее употреблявшаяся система сигнализации на постоянном или 60-Hz переменном токе будет заменена 100-Hz универсальной кодовой системой. Применение также кэб-сигнализации позволит машинисту иметь перед собой картину, имеющую место впереди поезда.

После выполнения новых работ Пенсильванская ж. д. будет иметь всего около 4100 km электрифицированных путей, или 41% всех электрифицированных магистральных ж. д. в США.

М. Д. Трейвас

WIDMER S. ТЯГОВЫЕ ПОДСТАНЦИИ С МУТАТОРАМИ РЕКУПЕРАЦИИ, НЕСУЩИМИ НАГРУЗКУ И НА ВЫПРЯМЛЕННОМ ТОКЕ, ВВС-М № 7, 1937, стр. 194—197

Тяговые подстанции, оборудованные мутаторами, которые позволяют возвращать в трехфазную сеть энергию, рекуперируемую подвижным составом, уже получили практическое применение. До настоящего времени на таких подстанциях некоторые из установленных мутаторов работали как выпрямители, преобразуя трехфазный ток в постоянный, а один из них работал только при рекуперации, превращая постоянный ток в трехфазный. Кроме недостаточного использования агрегатов, такая система вызывала необходимость держать рекуперирующий мутатор все время зажженным, и, следовательно, неизбежность хотя и незначительного тока через этот мутатор от мутаторов-выпрямителей вызывала дополнительный расход энергии.

Для уничтожения этих недостатков надо было создать систему, при которой все мутаторы подстанции при рекуперации мгновенно переключались бы с выпрямительного режима на мутаторный, в зависимости от направления мощности в контактной сети. Один из вариантов такой системы (рис. 1) был испытан на горном участке итальянских ж. д. и дал хорошие результаты.

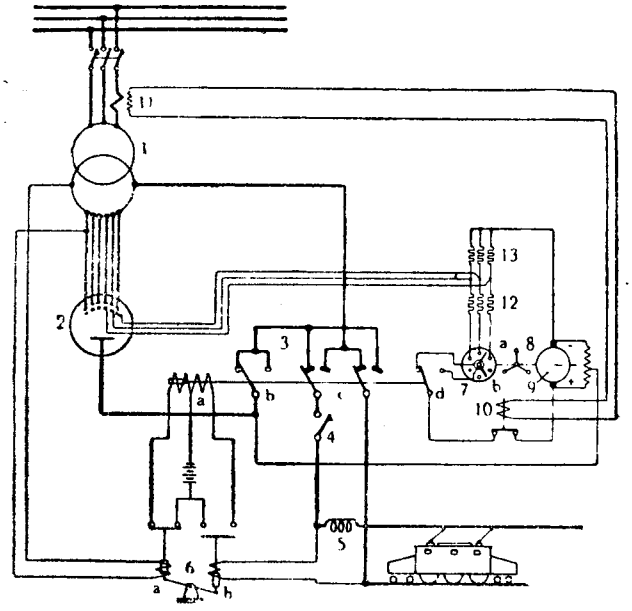


Рис. 1

Универсальный мутатор для выпрямления и рекуперации состоит из силового трансформатора *1* (рис. 1), сосуда с сеточным управлением *2* и быстродействующего переключающего устройства *3*. Последнее состоит из переключателя полярности контактной сети *c*, быстродействующего переключателя *b* с дугогасительной камерой, переключателя сеточного управления *d*, работающих от общего привода *a*. Описанное переключающее устройство работает таким образом, что сначала разрывает цепь быстродействующий переключатель *b*, затем переключаются *c* и *d*, после чего переключатель *b* вновь включается.

Защита агрегата со стороны выпрямленного тока осуществляется быстродействующим автоматом *4*, реагирующим на обратный ток. Для сглаживания выпрямленного тока служит реактор *5*. Переключение мутатора на выпрямительный или рекуперативный режим осуществляется с помощью дифференциального реле *6*, управляющего приводом *a* и сравнивающим анодное напряжение мутатора с напряжением контактной сети. Когда напряжение контактной сети превзойдет анодное, а это может быть только при наличии в контактной сети рекуперируемой энергии, не потребляемой в данный момент электровозами, идущими на подъем, реле *6* переключает мутатор на рекуперацию; при понижении напряжения в контактной сети оно вновь переводит мутатор на выпрямительный режим.

Агрегат сеточного управления состоит из синхронного мотора *8*, вращающего сеточный генератор постоянного тока *9* и коммутирующий диск *7*. Синхронный диск через сеточные сопротивления *12* и *13* снимает отрицательный полюс сеточного генератора с управляющих сеток, положительный полюс сеточного генератора через потенциометр подключается к катоду мутатора. Коммутация осуществляется через две щетки на синхронном диске; из этих щеток одна работает при выпрямительном режиме, а другая, неподвижная щетка, сдвинутая относительно первой

более чем на 90°, работает при рекуперации. Сеточная защита от перегрузки, как и на большинстве выпрямителей, управляемых синхронным диском, осуществляется отключением щеток устройства, снимающего отрицательный потенциал с сеток. На рис. 1 это осуществляется реле *10*, питаемым от трансформатора тока *11;* когда это реле разорвет свои контакты, сетки мутатора оказываются запертыми.

Для устойчивой работы мутатора при малых нагрузках первоначально включалось баластное сопротивление, в котором имели место определенные потери энергии; в дальнейшем оно было заменено конденсатором, приключаемым параллельно выпрямленному напряжению.

Таким образом практически осуществлен мутатор, переходящий с выпрямительного режима на рекуперативный без переключения анцапф трансформатора. Как видно из кривых нагрузки, полученных во время опыта, мутатор в течение получаса 9 раз переходил с выпрямительного режима на рекуперативный, причем продолжительность одного режима минимально составляла около 2 min.

Такой же принцип автоматического переключения мутатора еще год назад был разработан под руководством автора реферата студентом МЭИ Ю. Хлюпиным в дипломном проекте автоматической подстанции для питания троллейбуса в г. Курске (защищен весной 1937 г.).

В. А. Соловьев

SÜBERKRÜB. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕХНИКИ КОНТАКТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ. AEG-M № 10, 1937, стр. 340—346

Основная задача конструктора контактной сети электрической ж. д., трамвая и троллейбуса — осуществить контактную сеть, устойчивую от ветровых отклонений, обеспечивающую надежный контакт с токоприемником при больших скоростях движения, дешевую при постройке и эксплоатации, свободную от вредных колебаний (особенно контактную сеть троллейбуса) и достаточно эластичную. Простая полукомпенсированная цепная подвеска на отвесных струнках, применимая для скоростей движения не свыше 120 km/h, не может удовлетворить современный транспорт, требующий повышения скоростей движения до 150—180 km/h (40—50 m/sec).

Для таких высоких скоростей необходимо устранять недостаточную эластичность подвески под фиксатором, для чего применяется подвеска провода у опоры на наклонных струнках (Y-образная подвеска) или на вспомогательном тросе (Beiseil) длиной около 20 m, подвешенном за концы к основному несущему тросу и удерживающем контактный провод в нескольких точках. При значительном зигзаге длина вспомогательного троса не превосходит 12 m.

Для повышения упругости подвески под фиксатором трубчатый фиксатор заменяется оттяжным системы Неблера (Nebler). Фиксатор этой системы представляет собой смычок, удерживающий провод струнами, идущими под острым углом к фиксируемому проводу. Эти мероприятия позволяют создать одинаковую упругость контактного провода при поднимании его токоприемником как в средине пролета, так и под опорой. Разумеется, что при скоростной подвеске несущий трос должен иметь грузовую компенсацию температурных удлинений, так же как и контактный провод. Фирма AEG применяет для этой цели общий компенсатор, натягивающий и контактный провод и несущий трос с помощью рычажной передачи. Для скоростной подвески можно применять или поворотные кронштейны типа, применяемого на шведских ж. д., или жесткий кронштейн с передвижной точкой опоры подвесного изолятора. Таким образом основные данные цепной подвески для большой скорости движения поездов в основном выявлены.

В области простой подвески наибольшее значение имеет подвеска троллейбусного провода. Как известно, на контактный провод троллейбуса действует значительная поперечная нагрузка и при работе ролика в нем создаются упругие колебания. Поэтому в точках подвеса контактного провода имеют место большой износ, подгорания и частые поломки. На кривых, кроме того, ребордами ролика истирается боковая часть контактного провода и наблюдается ослабление затяжки провода в зажимах. Из многочисленных систем подвески троллейбусного провода хорошие результаты показала подвеска на поперечном тросе, изображенная на рис. 1. Отличие этой подвески для прямых участков пути (верхние фото на рис. 1) от применяемой у нас в Советском Союзе заключается в конструкции изолятора и в способе закрепления провода в клеммах. Для кривых большого радиуса шарнирная подвеска с промежуточным звеном имеет вид, показанный на среднем фото рис. 1, на кривых малого радиуса — на нижнем фото. Идея такой шарнирной подвески состоит в том, чтобы позволить проводу при любом положении трости токоприемника принимать такое положение, при котором прямая, проведенная через точку подвеса изолятора и контакт провода, совпадала с направлением трости. Однако бросается в глаза недостаток троллейбусной подвески, изображенной на рис. 1, по сравнению с применяемой в нашем Союзе — у нас изоляторы однотипны и для прямых и для кривых участков пути, а в подвеске AEG для кривых малого радиуса требуется специальный изолятор. Кроме того, не чувствуется типизации деталей подвески, которая проведена у нас.

Ознакомление с заграничной подвеской поможет нам овладеть техникой эксплоатации контактной сети для скоростных вагонов и троллейбусов.

В. А. Соловьев

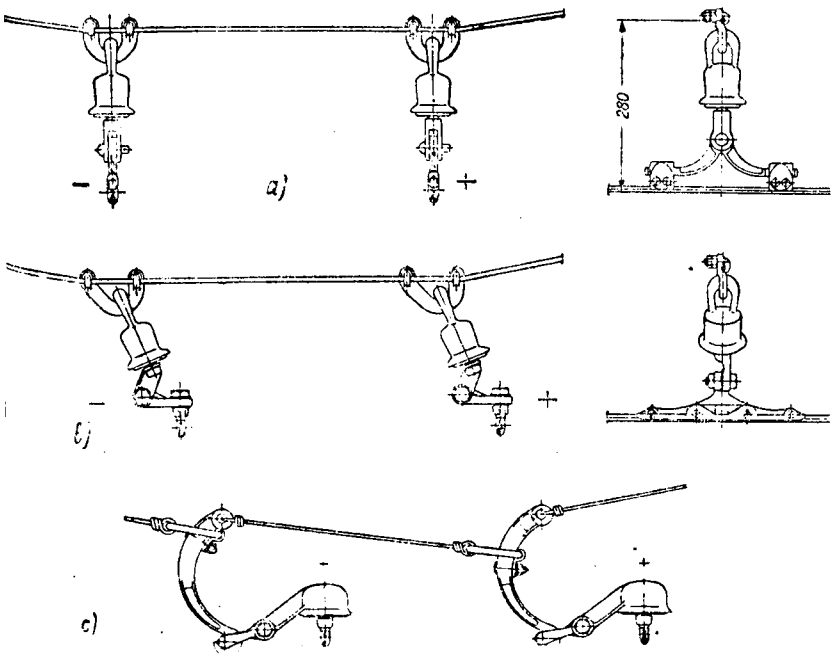


Рис. 1. *a* — подвеска на прямых; *b* — средняя подвеска на кривых большого радиуса; *c* — нижняя подвеска на кривых малого радиуса

ШВЕЙЦАРСКИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ ЭЛЕКТРОПОЕЗДА. Electric Railway Traction, декабрь, 10, 1937, стр. 1046—1049

На швейцарских ж. д. эксплоатируются два трехвагонных высокоскоростных электропоезда. Вес каждого 117 t, из коих 40 t — электрооборудование. Ток собирается двумя пантографами, расположенными по одному на внутренних концах крайних вагонов. Непосредственно под пантографом имеется небольшое помещение, где находятся трансформатор и вспомогательное электрооборудование.

Питание электропоездов производится стандартным в Швейцарии однофазным током 15 kV, $16^2/_3$ Hz. Часовая мощность 8 моторов (по одному на каждой оси крайних вагонов) составляет 2320 л. с. при 115 km/h; максимальная скорость 150 km/h.

Каждый мотор обладает часовой мощностью в 216 kW при 1800 об/мин, что при передаточном числе 1 : 2,64 соответствует скорости в 115 km/h.

Обе системы передачи (Эрликон и Сешерон) приспособлены к колесам малого диаметра.

Система управления, предложенная Броун-Бовери, вместо переключения выводов трансформатора достаточно проста; опыты с 7000 л. с. электровозами показали, что переключающие аппараты, действующие без разрыва цепи тока, работают хорошо.

В этой системе, как видно из рис. 1, первичная обмотка трансформатора *1* намотана вокруг сердечника, вторичная же *2* намотана на нее спирально и концентрически. Роликовые контакты *3*, скользящие по краям вторичной обмотки, собирают ток. Контакты приводятся в движение посредством моторного привода *4*.

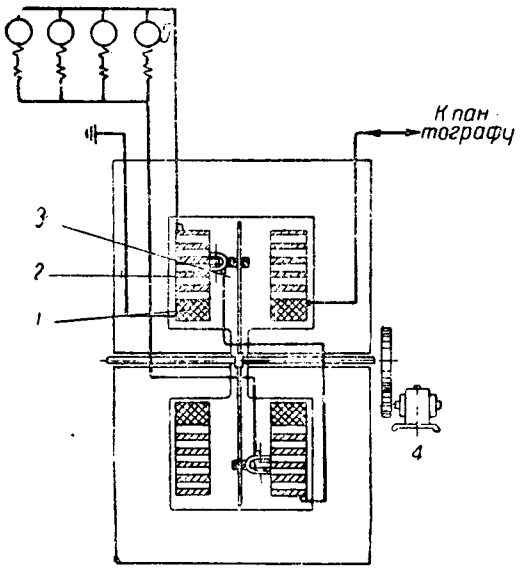


Рис. 1

1—первичная обмотка; *2*—вторичная обмотка; *3*—роликовый контакт; *4*—мотор управления; *5*—тяговые моторы

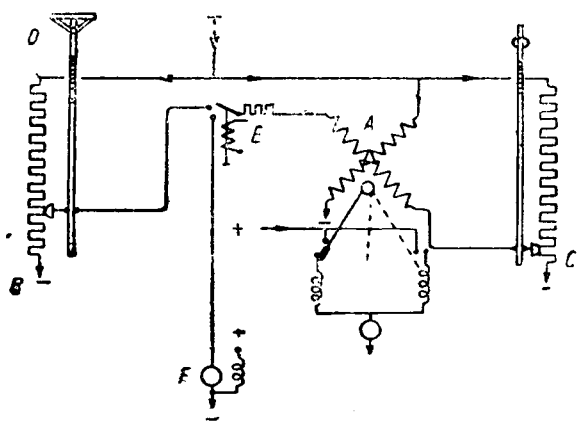


Рис. 2

A—поляризованное реле; *B*—потенциометр в контроллере; *C*—потенциометр на трансформаторе; *D*—рукоятка контроллера; *E*—переключающее реле; *F*—динамо

Такая система упрощает ее дальнеуправление.

Как видно из рис. 2, имеется поляризованное реле *A*, одна катушка которого подключена между двумя потенциометрами *B* и *C*, а другая — к осветительной батарее. Реле воздействует на переключающий контакт с возвращающей пружиной. Когда скользящий контакт на потенциометре *B* в главном контроллере движется вперед, катушка, включенная между *B* и *C*, питается током до тех пор, пока контакт потенциометра *C* регулирующего привода трансформатора не достигнет соответствующего положения. Реле, действуя на переключающий контакт, заставляет его замкнуть цепь приводного мотора (*4* на рис. 1), который может вращаться в ту или иную сторону. Мотор останавливается, когда контакты обоих потенциометров станут на точки равного потенциала. Если скользящий контакт на потенциометре *B* сместится, направление тока в катушке реле *A* изменится, и мотор вновь придет в движение в соответствующем направлении.

Подбором передачи трансформаторного привода рукоятка *D* главного контроллера может быть поставлена в конечное положение с момента пуска. Тогда напряжение будет возрастать постепенно, по мере того как скользящий контакт потенциометра *C* снова не достигнет положения, соответствующего положению контакта на потенциометре *B*.

Чтобы произвести мгновенное выключение, рукоятка контроллера приводится быстро в первоначальное положение, что немедленно заставляет переключатель приводного мотора сработать. В то же время регулирующая катушка поляризованного реле переключается посредством реле *E* на питание от динамо *F*, приводимой в движение от вагонной оси. Напряжение этой динамо пропорционально скорости вагона, и изменение напряжения трансформатора из-за действия управления мотора *4* приводит его к значениям, при которых возможно выключить тяговые моторы без толчка.

М. Д. Трейвас

MORTIMER CODD. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ

El. R. № 3135, 1937

За последние годы в технике вновь стали применяться методы получения постоянного тока высокого напряжения, основанные на использовании электростатической индукции.

Общими недостатками существующих электростатических машин являются: недостаточная прочность, громоздкость, низкий к. п. д., большая зависимость от климатических условий (особенно от влажности) и подверженность опрокидыванию полярности.

Основной путь улучшения отдачи электростатических машин — повышение числа оборотов, однако этому препятствует малая прочность стеклянных дисков. Даже при дисках из многослойных стекол нельзя пойти дальше нескольких сот оборотов в минуту.

Диски из эбонита также недостаточно прочны.

Существенно повысить число оборотов, а следовательно и отдачу машины удалось при диске (роторе), изготовленном из нового изолирующего материала Paxolin.

При этом отказались от наклейки на ротор секторов из фольги, применявшихся во всех классических типах электростатических генераторов.

Затруднения с возбуждением уменьшились при увеличении числа оборотов.

В машине, построенной автором реферируемой статьи, статор, в отличие от машины Гольца, имеет прямоугольную форму и изготовлен из стекла, заключенного в деревянную раму. Для улучшения отдачи машины зазор между ротором и статором сделан очень малым.

Воздух засасывается через отверстие в центре и прогоняется через зазор между ротором и статором, препятствуя их взаимному притяжению электростатическими силами.

Рядом со стеклянным статором помещается второй такой же лист стекла, закрывающий секторы из фольги. Края стекол, соединенные бумажными лентами, закрыты краями деревянной рамы. Ротором служит диск из Paxolin диаметром 21″ (530 mm).

Эта машина при 4500 об/мин давала ток свыше 15 mA при напряжении свыше 50 kV (длина искры > 7″).

Длина искры и сила тока, получаемые от электростатического генератора, растут с увеличением диаметра ротора. Однако при этом очень быстро растет потребляемая генератором мощность, что делает применение больших дисков невыгодным.

Если статор имеет 4 сектора (и соответственное число коллекторов) вместо 2, то сила тока увеличивается вдвое, но длина искры уменьшается больше чем вдвое.

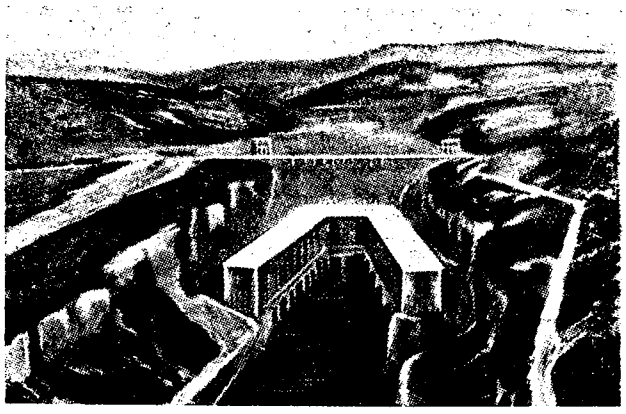
Поэтому для получения большего тока выгоднее применять 2 одинаковых ротора (на концах оси мотора) и включать их параллельно. Сравнительные испытания показали, что описанная машина значительно мощнее, чем машина Гольца с 16 дисками диаметром по 36″ или машина Бонетти с 20 дисками диаметром по 22″.

Автор реферируемой статьи утверждает, что построенный им электростатический генератор может для ряда целей (электротерапия, испытание изоляции, рентгенотехника, питание катодных осциллографов и т. д.) заменить высоковольтные установки с кенотронами.

А. И. Фройман

КРУПНЕЙШАЯ ГИДРОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ ФРАНЦИИ. The El., Vol. CXX, № 3114, February 4, 1938, p. 141

На Роне сооружается гидроэлектрическая установка Genissiat. Гидростанция будет состоять из двух независимых зданий, расположенных по обеим сторонам Роны и соединенных между собой галлереей. В каждом здании предполагается установить по четыре агрегата мощностью по 55 000 kW каждый. Полная установленная



Общий вид гидроэлектрической установки Genissiat

мощность станции — 440 000 kW при обеспеченной постоянной мощности 416 000 kW.

Два 220-kV повысительных трансформатора будут расположены на одном уровне со зданием станции, на дне Ронского ущелья. Сооружаемая плотина имеет высоту от подошвы фундамента 100 m, она подымет уровень реки на 65 m. Подпор воды распространится до Женевского озера. Водохранилище выше плотины будет использовано для суточного регулирования, суточное колебание уровня воды в нем будет не более 0,45 m. В качестве сезонного регулирующего водохранилища используется Женевское озеро.

Годовая выработка станции в катастрофически маловодный год, при работе станции 9 h в сутки при полной мощности и остальное время суток при пониженной мощности, определяется в 1 800 000 MWh.

С. И. Толкачев

SCHONLAND. ДИАМЕТР КАНАЛА МОЛНИИ. Philosophical magazine and journal of Science № 154, март 1937

Диаметр ствола молнии является важным параметром в изучении процессов, происходящих в канале разряда, однако значения диаметра, приводимые различными экспериментаторами, расходятся между собой.

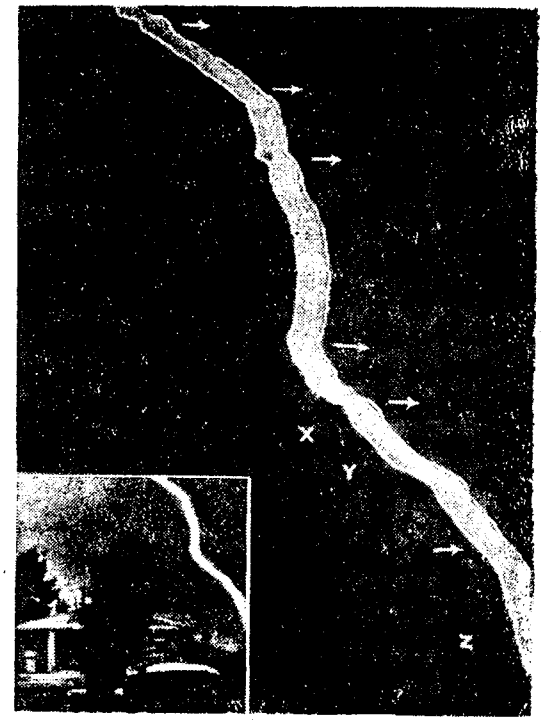
Так, Теплер дает для диаметра верхний предел в 40 cm, замечая при этом, что при ударе молнии в базальт им наблюдались диаметры канала всего в несколько сантиметров. Доказательства этого типа косвенны и из-за неучета ряда факторов могут привести к ошибкам. Малые диаметры могут иметь место вследствие разветвления молнии у земли, когда в объект попадает только часть тока разряда.

Большие диаметры иногда не соответствуют действительности благодаря влиянию ветра, сдвигающему в пространстве каналы отдельных импульсов разряда. Поэтому неподвижные фотокамеры для определения диаметра канала непригодны. Влияние ветра легко устранить, двигая камеру так, чтобы отделить друг от друга составляющие удара. Снимки необходимо делать на близком расстоянии от разряда с тем, чтобы ширина канала была в пределах разрешающей способности объектива.

Ниже разбирается снимок (сделанный неподвижной камерой), где необходимый сдвиг изображений каналов отдельных импульсов разряда осуществлен ветром.

Удар протекал в чистом воздухе (без дождя) на расстоянии 230 ÷ 280 m от камеры.

Разряд состоит из 11 импульсов, из которых первый (слева) наиболее широк и разветвлен; импульсы 2, 3, 4



и 8, 9 едва разделены. Изменение петель и изгибов указывает на то, что имели место значительные местные колебания в величине и направлении скорости ветра. Однако в средней скорости ветра, в пределах 70-m разряда, не было замечено больших отклонений. Измерив на снимке промежуток между 1 и 11 импульсом и зная расстояние до места разряда, легко определить фактическое разделение первого и последнего импульса; оно оказалось равным 3,7 m по перпендикуляру к линии зрения. Скорость ветра в том же направлении составляет 8 m/sec. Таким образом весь удар длится 0,46 sec, причем средний интервал времени между ударами составляет 0,046 sec. Эта цифра находится в полном соответствии с наиболее вероятным интервалом в 0,03 sec, установленным ранее для этой местности. Самый большой интервал времени в 0,08 sec наблюдается между двумя последними импульсами. Наиболее короткий интервал 0,02 sec имеет место между 2, 3, 4 и 8, 9 импульсами.

Что касается разрешающей способности линз, то полученная ширина каналов превышает ее более чем в 10 раз. Действительные диаметры каналов, подсчитанных с учетом расстояния от камеры до разряда, сведены в таблицу.

Импульс	1	2	3	4	5	6	7	8—9	10	11	... x	y
Диаметр канала, cm . . .	23	20	16	16	16	15	19	19	16	11	13	17

Как видно, диаметр равен в среднем около 16 cm, несколько увеличиваясь в случае сильных первых ударов и уменьшаясь для разветвлений. Беллаши, измеривший фотографическим путем диаметр канала искры при токе того же порядка, что и ток молнии (14 . 10^3 A), дает значения диаметров 10 ÷ 25 cm, весьма близкие к приведенным выше. Однако по его мнению эти цифры значительно превышают действительный диаметр канала разряда. Так, при искре той же интенсивности на поверхности полированного электрода образуется пятно диаметром в 1,5 cm. Искра, проходящая сквозь трубку диаметром 2 cm, развивает внутри ее давление взрыва, превышающее 15 000 at. Результаты этих двух опытов противоречат друг другу, так как, учитывая, что температура канала искры вряд ли превышает 12 . 10^3 °C и плотность воздуха в течение весьма краткого времени нагревания канала остается постоянной, легко показать, что максимально возможное давление в канале равно 40 at.

Вероятно более высокие давления, полученные Беллаши, возникли потому, что разряд был заключен в трубку более узкую, чем естественные размеры канала искры. Выводы же из первого опыта Беллаши, повидимому, ошибочны вследствие того, что разряд в нем отводился к центру электрода при помощи тонкой металлической проволочки, распыляющейся при мощной искре. Автор склонен думать, что действительный диаметр канала близок к значению в 16 cm, полученному при помощи фотокамеры.

Х. С. Валеев, В. С. Комельков

НОВЫЙ КАБЕЛЬ НА 125 kV. El. Rev. № 3142, 11/II 1938, стр. 192

Фирмой Сименс-Шуккерт в Германии изготовлен новый высоковольтный маслонаполненный кабель, который уложен на алюминиевом заводе (Reinfelden Aluminium Werke) и служит для присоединения выпрямительной подстанции к воздушной линии высокого напряжения.

Длина каждого куска кабеля около 550 m, благодаря чему отпала необходимость в соединительных устройствах. Шесть параллельно уложенных кабелей образуют две независимых группы, каждая из которых достаточна для передачи всей нагрузки. Этим предотвращены перерывы питания, недопустимые на алюминиевом заводе. Структура кабеля показана на фотографии: вокруг центральной спирали уложено два слоя плоских алюминиевых проволок; затем слой изоляции толщиной около 13 mm; свинцовая оболочка кабеля покрыта слоем, предохраняющим от коррозии, и обмотана лентой из альдрея, натяжение которой уравновешивает давление масла внутри кабеля; дальше следуют слои битума и резины, защищающие кабель от химических воздействий и разъедания блуждающими токами; наружный слой из плоской проволоки и внешняя защитная оплетка завершают кабель.

А. И. Фройман

R. SCHARLL. ДВИГАТЕЛИ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА ДЛЯ БОЛЬШОГО ЧИСЛА ВКЛЮЧЕНИЙ В ЧАС. AEG Mitt. № 9, 1937, стр. 302—306

Применение двигателей с короткозамкнутым ротором для повторно-кратковременного режима работы лимитируется тем, что все тепловые потери при переходных режимах не успевают отводиться. Поэтому допустимое число реверсов в час для двигателя с к.-з. ротором весьма ограничено.

Увеличением сопротивления обмотки ротора и соответствующим расчетом параметров обмотки статора можно добиться снижения суммарных потерь в двигателе. Поэтому к.-з. двигатели для большого числа включений в час приходится снабжать специальными обмотками статора и ротора.

При торможении двигателя по методу противовключения от синхронной скорости до полной его остановки потери в роторе достигают трехкратной величины по сравнению с нормальными потерями при пуске. Если же учесть необходимость реверса двигателя, а следовательно, и последующий за торможением разгон до скорости, близкой к синхронной, то потери будут больше потерь для нормального случая пуска в 4 раза.

Максимальное число реверсов на холостом ходу двигателя (без дополнительных маховых масс) с торможением по методу противовключения при условии ограничения получаемой температуры нагрева, равной максимальной допустимой температуре для двигателя, автор называет характеристическим числом реверсов двигателя — Z_0.

При наличии дополнительных маховых масс число допустимых реверсов двигателя будет ниже. В свою очередь при применении торможения двигателя постоянным током или механическим тормозом число допустимых реверсов повышается. Торможение постоянным током снижает потери в двигателе в 2 раза, механическое же торможение из-за отсутствия джоулевых потерь снижает потери в 4 раза по сравнению с торможением противовключением. Тем самым повышается число реверсов в случае торможения постоянным током вдвое и в случае механического торможения — в 4 раза. Допустимое число реверсов зависит, естественно, и от нагрузки, причем с увеличением нагрузки оно снижается.

Для допустимого числа реверсов в час — Z, автор дает следующие формулы:

для торможения по методу противовключения

$$Z = Z_0 f_s = f_b;$$

постоянным током

$$Z = 2Z_0 f_s f_b;$$

для механического торможения

$$Z = 4Z_0 f_s f_b,$$

где f_s и f_b — соответственно, коэфициенты, учитывающие дополнительные маховые массы и нагрузку.

Коэфициент

$$f_s = \frac{GD_a^2}{GD_a^2 + GD_z^2},$$

где GD_a^2 — маховой момент ротора двигателя в kgm²;

GD_z^2 — дополнительный маховой момент рабочей машины и передач, приведенный к валу двигателя, в kgm².

На рис. 1 представлена графическая зависимость f_s от отношения $\frac{GD_z^2}{GD_a^2}$.

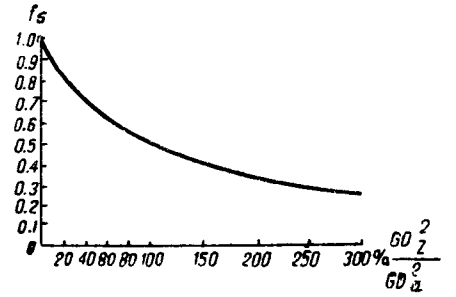


Рис. 1

Коэфициент f_b находится по кривой рис. 2 в зависимости от отношения нагрузки P к некоторой мощности P_z, которую автор называет предельной.

Под этой мощностью он понимает допустимую мощность для нормальной скорости при условии наименьшего числа реверсов (Z составляет около 10 реверсов в час), нагрузке двигателя на обратном ходу на 0,4 P_z и реверсирование без нагрузки.

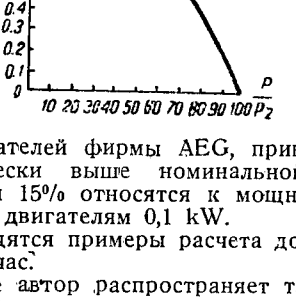


Рис. 2

Для ряда двигателей фирмы AEG, приведенных в таблице, P_z практически выше номинальной мощности на 15 ÷ 50%, причем 15% относятся к мощности двигателей 6 kW, а 50% — к двигателям 0,1 kW.

В статье приводятся примеры расчета допускаемого числа включений в час.

Все изложенное автор распространяет также и на многоскоростные двигатели с переключением числа пар полюсов.

Для учета времени разгона и торможения приняты следующие средние значения пусковых моментов двигателей Md на холостом ходу:

для двигателей Бушеро или с глубоким пазом

$$Md = (1{,}4 \div 1{,}5)\, Md_N,$$

для двигателей с переключением числа пар полюсов

$$Md = (1 \div 1{,}2)\, Md_N,$$

где Md_N — номинальный момент двигателя.

Средний тормозной момент при торможении противовключением к.-з. двигателей в 2 ÷ 3 раза больше среднего пускового момента.

В статье приводится пример подсчета времени пуска и торможения для трехскоростного двигателя.

М. И. Зильберман

W. KRÄMER. ПРОСТОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР ТОКА ДЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ETZ, т. 58, № 49, 9 декабря 1937, стр. 1309—1313

В статье описан трансформатор тока, не имеющий каких-либо движущихся частей и обладающий в отношении постоянного тока всеми свойствами обычного трансформатора тока. Такой трансформатор тока, схема которого приведена на рис. 1, состоит из двух кольцеобразных железных сердечников *A* и *B*, каждый из которых снабжен равномерно распределенной по окружности вторичной обмоткой. Каждая из этих обмоток разбита на ряд отдельных секций, соединяемых друг с другом параллельно[1]. Обмотки обоих сердечников соединяются последовательно навстречу друг другу и присоединяются к источнику вспомогательного напряжения переменного тока $U\sim$.

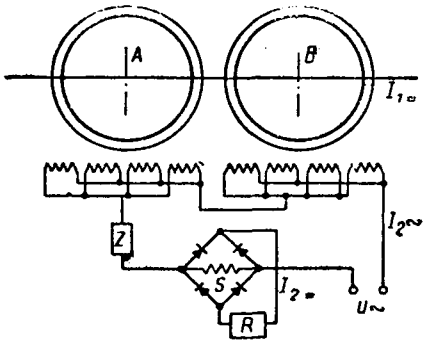


Рис. 1. Схема трансформатора тока. *R* — измерительный прибор; *S* — насыщающийся дроссель для ограничения тока в *R* при к. з.; *A* и *B* — сердечники

Первичная обмотка (на рис. 1 — один виток) охватывает оба сердечника. При применении для сердечников материала с резко выраженным коленом кривой намагничивания (высокая дифференциальная магнитная проницаемость при малых значениях напряженности поля и очень малая — при больших) намагничивающий ток, потребляемый вторичной обмоткой от сети переменного тока, оказывается строго пропорциональным постоянному току в первичной обмотке. Это объясняется тем, что если в некоторый момент токи в обеих обмотках одного из сердечников текут в одном направлении, — этот сердечник насыщается, и поток его остается практически неизменным, и э. д. с., наводимая в его обмотке, оказывается равной нулю, каковы бы ни были токи в его обмотках. Поэтому почти все напряжение $U\sim$ ложится на обмотку второго сердечника, у которого токи в первичной и вторичной обмоток направлены в противоположные стороны. Однако для того чтобы поток этого сердечника мог изменяться по закону, определяемому кривой приложенного напряжения, необходимо, чтобы намагничивающие ампервитки, равные разности магнитодвижущих сил первичной и вторичной обмоток, были очень малы.

Таким образом ток во вторичной обмотке $I_{2\sim}$ будет в течение всего полупериода очень близок к значению, равному измеряемому току, умноженному на отношение чисел витков первичной и вторичной обмотки, независимо от величины и частоты вспомогательного напряжения $U\sim$, В следующей полупериод сердечники *A* и *B* меняются ролями. Выпрямляя ток $I_{2\sim}$, можно получить в измерительном приборе *R* (рис. 1) постоянный ток I_2—, пропорциональный первичному току. Интересно отметить, что в случае если первичный ток содержит переменную составляющую, то она тоже полностью передается во вторичную цепь, как это видно из осциллограммы рис. 2. Точность

[1] Для выравнивания значений магнитной индукции в различных сечениях сердечника.

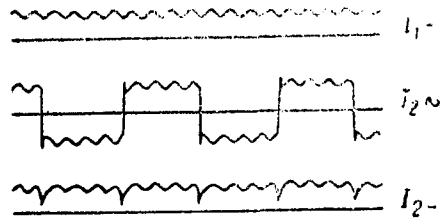


Рис. 2. Осциллограмма первичного и вторичного тока трансформатора. I_1 — первичный ток; $I_{2\sim}$ — ток во вторичной обмотке; I_{2-} — ток в измерительном приборе

такого трансформатора при применении для сердечников железо-никелевых сплавов (например мюметалла) соответствует трансформаторам тока класса 0,5 или 1,0. Колебания вспомогательного напряжения $U\sim$ на 30% вызывают изменения вторичного тока не более чем на 0,2%.

Четные гармонические составляющие магнитных потоков сердечников такого трансформатора тока могут быть выделены с помощью особой вспомогательной обмотки и использованы для приведения в действие электродинамического реле обратного тока. Благодаря особенностям работы этого трансформатора чувствительность такого реле оказывается очень высокой.

Б. И. Филиппович

ВЫКЛЮЧАТЕЛЬ „ORTHOJECTOR". El. R., 14 января 1938

L. D. FOURCAULT „САМЫЙ МОЩНЫЙ В МИРЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ВЫКЛЮЧАТЕЛЬ". La Science et la Vie; сентябрь 1937

На всемирной Парижской выставке во Дворце электричества демонстрировался операционный однополюсный выключатель расширительного типа («orthojector»), рассчитанный на разрывную мощность 5000 MVA при напряжении 500 kV. Четыре стандартных контактных механизма выключателя установлены по два в вертикальном положении на двух колоннах фарфоровых изоляторов. В каждой из четырех цилиндрических выключательных камер дуга гасится стремительным потоком масла и газов в течение времени порядка 0,05 sec. Полное же время действия выключателя составляет около 0,2 sec. После осуществления процесса выключения тока автоматически происходит отъединение выключателя с помощью двух наружных разъединителей. Выключатель содержит только 200 *l* масла, что представляет незначительную величину по сравнению, например, с обыкновенным однополюсным масляным 220-kV выключателем, на который расходуется 16 t масла. Высота операционного выключателя для напряжения 500 kV составляет 12 m. Первый выключатель этого типа для напряжения 220 kV с двумя выключательными камерами удовлетворительно работает в Rueyres на парижской линии электропередачи с 1932 г.

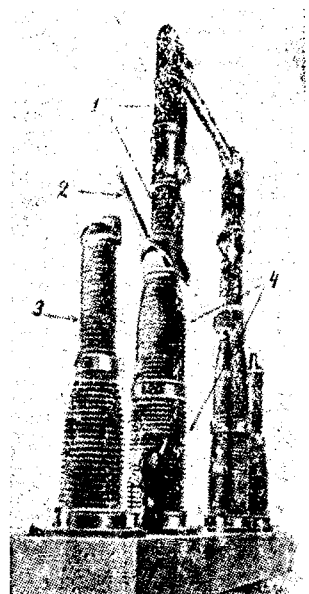


Рис. 1. Расширительный выключатель для напряжения 500 kV.

1 — выключательные камеры; *2* — разъединитель; *3* — подвод тока; *4* — изоляторы

Н. А. Караулов

H. V. PUTMAN и W. W. SATTERLEE. ОГНЕБЕЗОПАСНЫЕ ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ. El. W., december 18, 1937, p. 55

Исследовательской лабораторией фирмы Вестингауз выполнены первые трехфазные трансформаторы с изоляцией класса B для промышленных установок.

Мощность трансформатора 500 kVA; первичная обмотка 216 V — звезда, вторичная — 13 750 V — треугольник.

Вся изоляция выполнена исключительно из фарфора и специального асбеста. Охлаждение трансформатора — воздушное.

Межвитковая изоляция первичной обмотки создана путем применения фарфоровых прокладок, фарфоровые же прокладки разделяют обмотки; межвитковая изоляция вторичной обмотки состоит из специального асбеста.

Трансформатор может выдерживать температуры до 350°. Получение того же реактанца, что и в маслонаполненных трансформаторах, из-за большого расстояния между обмотками требует увеличения магнитной цепи и соответствующего пересчета числа витков. Следовательно, чтобы общие потери не увеличились, необходимо итти по пути уменьшения медных потерь.

Трансформаторы подвергались испытаниям на влагоустойчивость. Они устанавливались на открытом воздухе и испытывались дождем в течение шести дней. Водяная пыль подавалась в течение 6 h ежедневно. На некоторый срок трансформатор выключался для того, чтобы облегчить проникновение влаги.

Испытания изоляции проводились по нормам AIEE.

После удовлетворительных результатов не остается сомнений, что выполненные фирмой трансформаторы являются большим шагом вперед в трансформаторостроении и представляют значительный интерес для наших заводов.

В. А. Баев

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Речь тов. Сталина на приеме в Кремле работников высшей школы 17 мая 1938 г. 1

Буткевич Ю. В. — Развитие высоковольтного аппаратостроения в СССР и электроизоляционная техника 2

Червоненкис Я. М. — Возможности передачи энергии Куйбышевской гэс постоянным током высокого напряжения 6

О передаче энергии Куйбышев—Москва постоянным током 14

Франкфурт Я. Л. — Методы рационализации и нормирования потребления электроэнергии при прокатке черных металлов 18

Стекольников И. С. и Ламдон А. А. — Измерение ферромагнитными регистраторами токов молнии в энергосистемах СССР 29

Городецкий С. С. и Войденов Н. Н. — О конструкциях трехжильных кабелей с поясной изоляцией на напряжение 6—10 kV 39

Жданов П. С. — Параллельная компенсация линий электропередачи с помощью насыщенных дросселей 44

Толвинский В. А. — К систематике замкнутых якорных обмоток машин постоянного тока . . 49

Нестеренко А. Д — Контроль установок для поверки измерительных трансформаторов . . 59

Левин М. И. — Измерение малых сопротивлений диференциальными аппаратами для поверки трансформаторов тока 65

Шателен М. А. и Миткевич В. Ф. — Памяти В. К. Лебединского 67

Основные даты из жизни и деятельности проф. В. К. Лебединского 68

Лебединский В. К. — Вариации явления Баркгаузена (ступенчатое намагничение) 69

На обложке: Плакат, выпущенный Изогизом к предстоящим выборам в Верховный Совет РСФСР. Работа художницы В. Ливановой

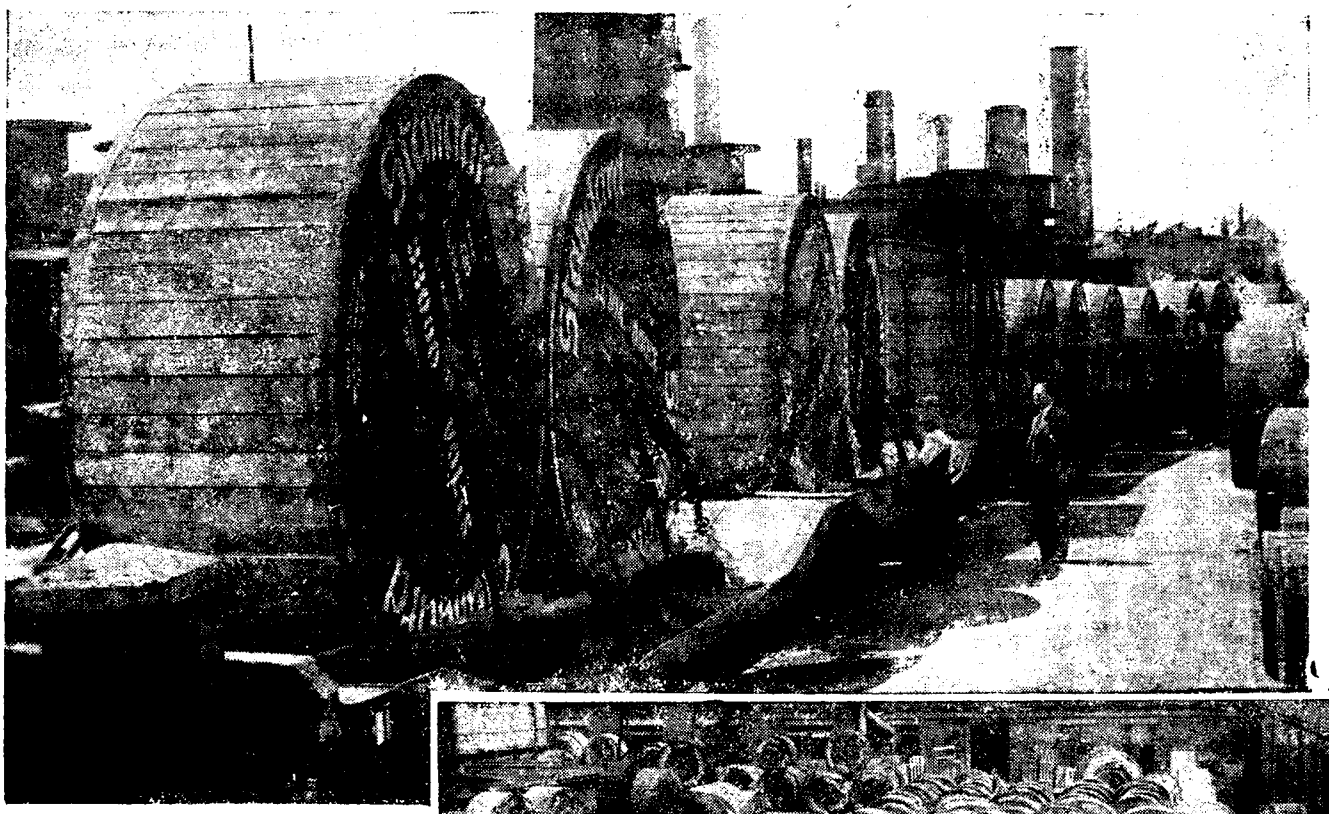
ВОЛОГОДСКАЯ
ЧИТАЛЬНЫЙ ЗАЛ
Обл. Библиотека

ИЗДАТЕЛЬ ГОНТИ
Техн. редактор **А. П. Александрова**
Зав. ред. **М. Г. Башкова**

Отв. редактор Я. А. КЛИМОВИЦКИЙ

Сдано в набор 19/IV 1938 г. Подп. к печати 31/V 1938 г. Стат. ф. 226×293 1/8
Печ. л. 11. У. а. л. 14,3 Печатн. зн. в листе 78 800.
Уполн. Главлита Б-40914 1-я Журн. тип. ГОНТИ НКТП, СССР. Москва, Денисовский пер., 30. Заказ. 764. Тираж 1100 экз.

СИЛОВЫЕ КАБЕЛИ
ЛЮБОГО НАПРЯЖЕНИЯ



Для отправки грузовиками, по железной дороге и морем поставщикам и потребителям электроэнергии в Англии и заграницей

Присылайте Ваши спецификации на силовые кабели "STANDARD"

Standard Telephones and Cables Limited

NORTH WOOLWICH, LONDON, E.16. АНГЛИЯ

ОТДЕЛЕНИЯ И ПРЕДСТАВИТЕЛЬСТВА ВО ВСЕМ МИРЕ

Выписка заграничных товаров может последовать лишь на основании действующих в СССР правил о монополии внешней торговли.

МАШИНЫ БРИДЖА ДЛЯ КАБЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

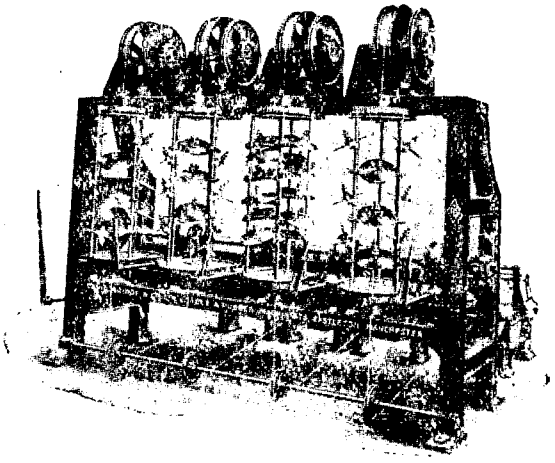
современны по проектированию, солидны по конструкции

● Полное оборудование для кабельных заводов

Фирма БРИДЖ строит машины для всех без исключения работ и производств в кабельной промышленности. Каждая машина воплощает ряд новейших улучшений, являющихся результатом непрерывных опытов и изысканий, и дает повышенную производительность и легкость в работе. На рисунке показана

12-ти катушечная машина для покрытия кабелей бумагой, с вертикальным 4-х барабанным ординарным станком.

Построена для одновременного покрытия 4-х проводников небольшого сечения. Каждый барабан вмещает 12 бумажных дисков. Каждое головное и подъемное колесо по отдельности приводится в действие посредством патентованных фрикционных муфт Heywood и Bridge



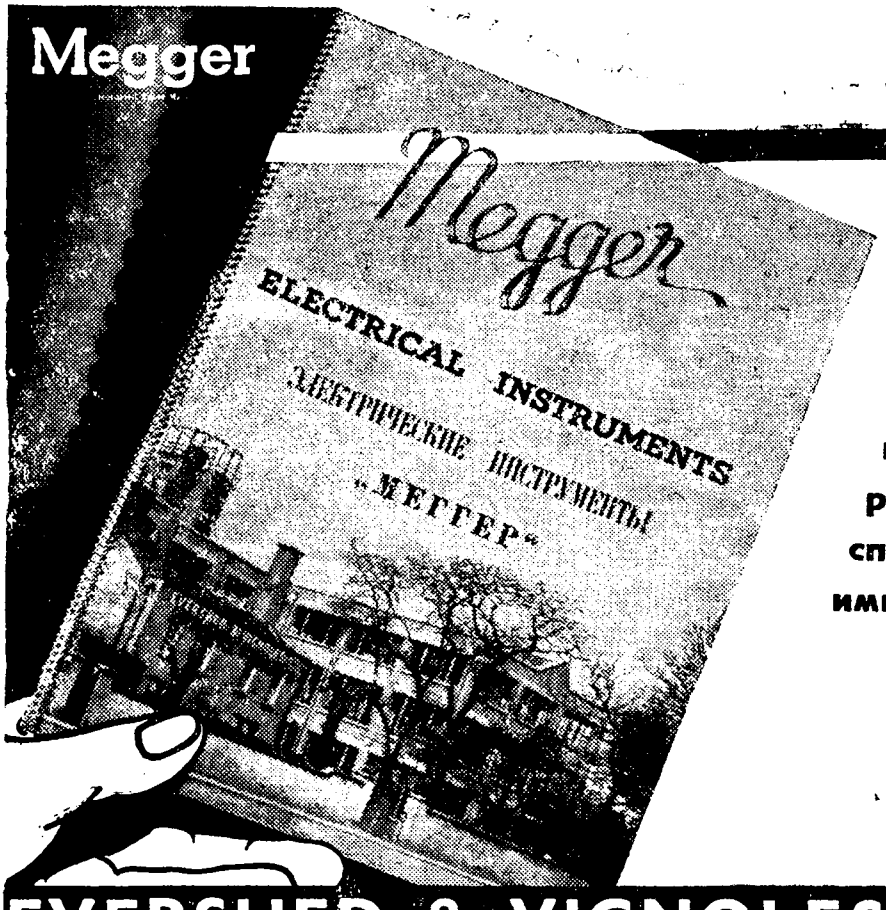
DAVID BRIDGE & Co. Ltd.

ENGINEERS, IRON AND BRASS FOUNDERS

Castleton, Manchester Eng.

а также:

Aldwych House, ALDWYCH, LONDON W.C.2 (Англия)



Фабриканты ряда приборов для испытания изоляции проводов составили на русск. языке полный список изготовленных ими аппаратов.

Требуйте по нижеуказанному адресу бесплатной присылки списка № R. 178.

ENGLAND

EVERSHED & VIGNOLES, LTD. CHISWICK LONDON

4-175

N. V. NEDERLANDSCHE KABELFABRIEK

DELFT (Голландия)

■■■■

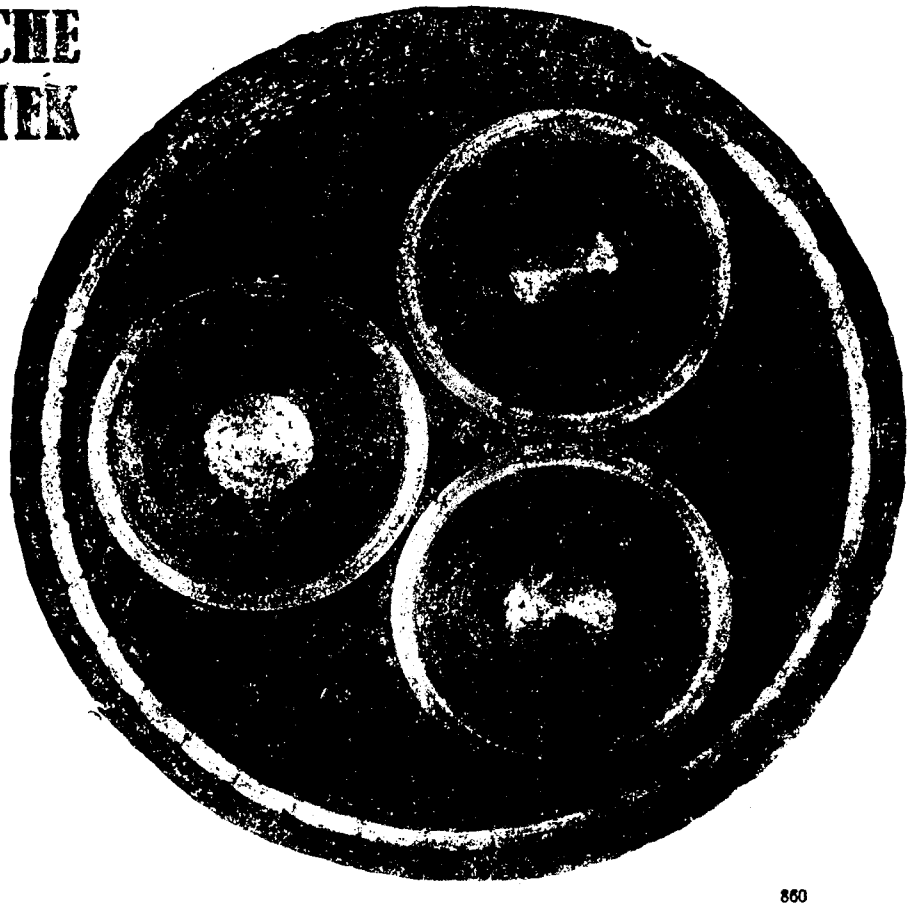
ПРОИЗВОДИТ:

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



860

...и для сильного тока с резиновой изоля-
...ей с пропитанной бумагой.
...ольные кабели - Телефонные кабели.
...лока и кабели с резиновой изоляцией.

...RIES et CORDERIES du HAINAUT, S.A., DOUR.

Бельгия.

SOCIÉTÉ BELGE

POUR LA FABRICATION DES

CABLES ET FILS ÉLECTRIQUES S.A.

79, rue du Marché, BRUXELLES (Бельгия)

Адр. для телегр. : FABRICABLE, Bruxelles | Телегр. Коды : A. B. C. 5 и 6th, Bentley's

ИЗОЛИРОВАННАЯ ПРОВОЛОКА И КАБЕЛИ

для всех электротехнических целей

БРОНИРОВАННЫЕ КАБЕЛИ

низкого и высокого напряжения

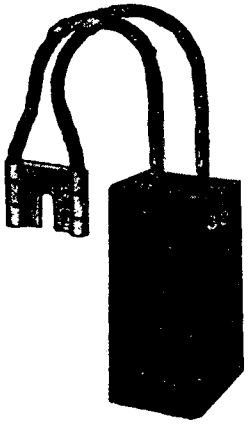
ТЕЛЕФОННЫЕ КАБЕЛИ

ИЗОЛЯЦИОННЫЕ ТРУБКИ

с освинцованной железной оболочкой и стальные

СТАЛЬНЫЕ НЕИЗОЛИРОВАННЫЕ ТРУБКИ

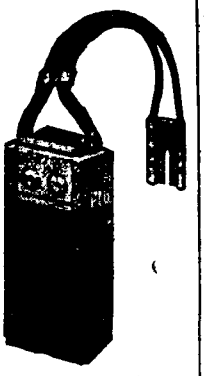
электросваренные, крытые красным и черным лаком



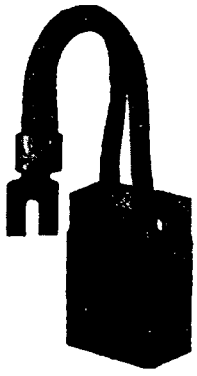
SCHUNK & EBE

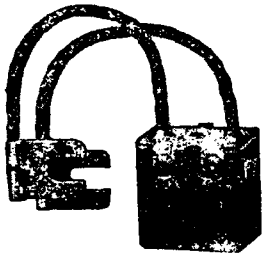
GIESSEN (Германия)

Фабрика угольных щеток и щеткодержателей

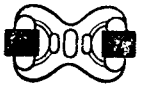


Мы являемся между прочим постоянным поставщиком всех сортов и качеств изображенных в настоящем об'явлении угольных щеток для советских промышленных предприятий

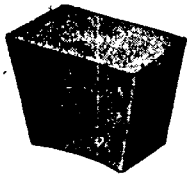




Наша фабричная марка



гарантия высокого качества



6737

Преимущества

сменных сопротивлений манометра WG (см. предыдущие и последующие об'явления) заключаются:

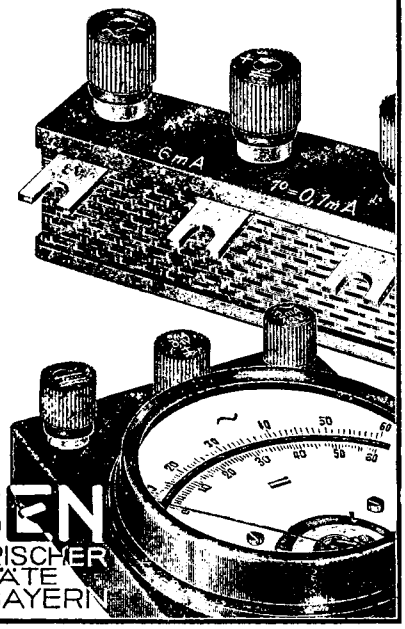
в соответствии электрических единиц,

возможности любого подразделения шкалы,

удобстве и простоте починки,

достижении максимальной точности измерения и

низкой цене



6786

GOSSEN
FABRIK ELEKTRISCHER MESSGERÄTE
ERLANGEN/BAYERN

„ИЗОЛА“

изоляционные материалы для электротехники

Изделия „мика“
Фибры пропитанные бакелитом
Пропитанное сукно, пропитанный шелк
Изолировочная бумага
Пропитанные ткани
Пропитанный азбест
Изоляционные лаки
Изолированная проволока:
эмалированная проволока,
изолирующая лента,
азбеститовая проволока
Изолирующие трубки (не на тканной основе)

Schweizerische Isola-Werke
Breitenbach (Швейцария)

6736

ТОВАРНА НА КАБЛЕ, Акц. О-ВО

БРАТИСЛАВА (Чехословакия)

МЫ ИЗГОТОВЛЯЕМ:

стойкую в отношении масла и безопасную в отношении пробоя фибру марки „ГУММОИД" для электротехники высокого напряжения.

Она поставляется: в пластинах размерами до 1150x1750 мм, в цилиндрах диаметрами до 1200 мм, а также в виде фасонных труб, прутков или других конструкционных деталей.

6748

Чистое железо АРМКО — рекомендуется для телефонных и радио-аппаратов. Благодаря своей исключительной чистоте — сумма пяти элементов : углерода, марганца, кремния, серы и фосфора ниже 0,15%—железо АРМКО имеет необыкновенно высокую магнитную проницаемость. Поставляется в виде лент горячей и холодной прокатки, в виде круглых и квадратных брусков, а таюже в виде профильного железа.

Трансформаторная сталь АРМКО — Производство включает все сорта трансформаторной листовой стали. Обращаем Ваше особое внимание на нашу марку "Trancor 5" с потерей в 1 watt при B = 10.000 и 50 периодах. Листы марки "Trancor 5" имеют ровную и гладкую поверхность и поддаются легко штамповке.

Специальные стали — Нержавеющие стали для всех целей. Огнестойкие стали марки "Сикромаль". В особенности рекомендуем цельнотянутые легированные трубы (до 1500 мм. диаметром) для пароперегревателей, воздухонагревателей, труб для чистки котлов и т. д.

ARMCO

ARMCO

6, Avenue Gourgaud, 6 - PARIS (XVIIe) Франция

В СОЕДИН. ШТАТАХ:
The ARMCO International Corp.
Middletown, Ohio и
21 West Street, NEW YORK City

В ГЕРМАНИИ:
ARMCO-EISEN G.m.b.H.
Armco-Haus, Sedanstrasse, 37. KOELN a/Rh.

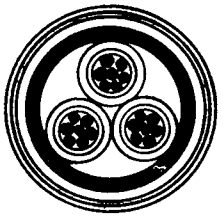
В АНГЛИИ:
ARMCO Ltd.
Thames House, Millbank
LONDON S.W.1.

В ИТАЛИИ:
ARMCO S.A.
Via S. Lorenzo 4. GENOVA

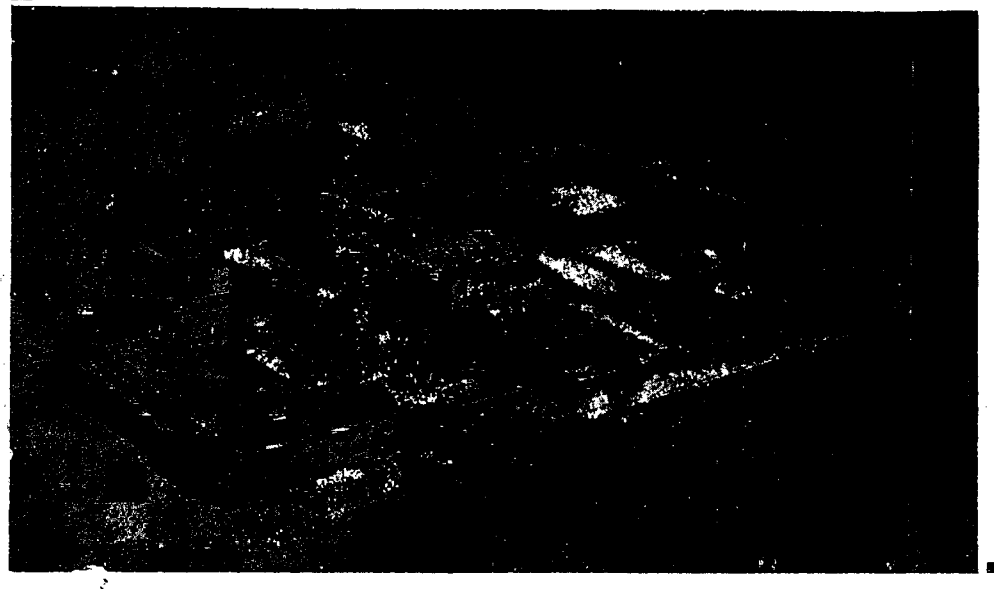
DRAKA

N.V. HOLLANDSCHE DRAAD- EN KABELFABRIEK AMSTERDAM — HOLLAND.

адрес для телеграмм: DRAKA · AMSTERDAM · ГОЛЛАНДИЯ

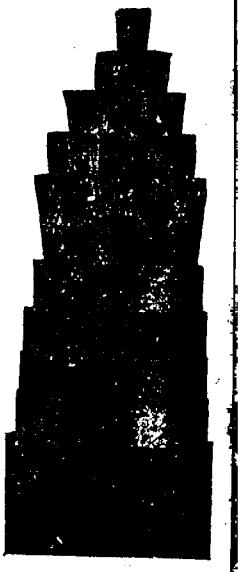


специальность:
все сорта проволоки и кабелей для электричества с резиновой изоляцией.



Все во всем мире пользуются телефонными кабелями производства

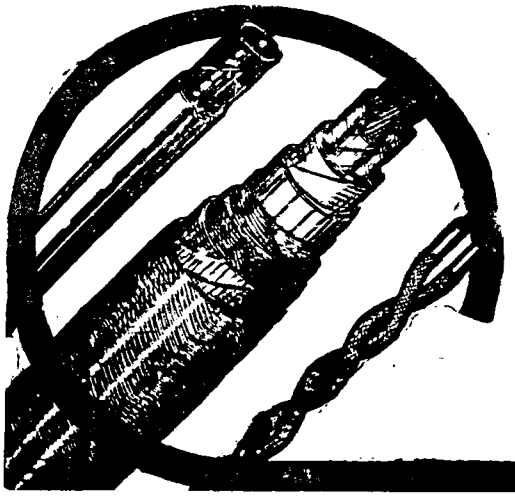
Ateliers de Constructions Électriques de Charleroi



РЕФЕРЕНЦИИ: 2000 км. международных пюпинизированных кабелей. Тысячи километров городских и междугородних кабелей. Поставки в Британскую Индию, Сиам, Австралию, Египет, Южную Америку, Бразилию, Голландию и т. д., и т. д.

CABLERIE CHARLEROI

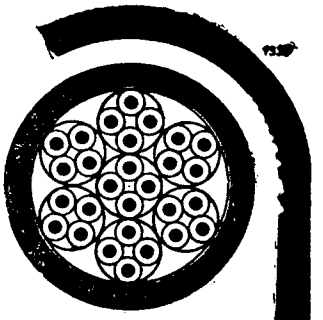
КАБЕЛЬНЫЙ ЗАВОД ШАРЛЕРУА (Бельгия)



Свинцовые кабелк
для сильных токов, телефона, телеграфа, сигнализации, радио и телевизии, а также принадлежности к ним.

Провода с резиновой изоляцией
любого назначения

Изоляционные трубки

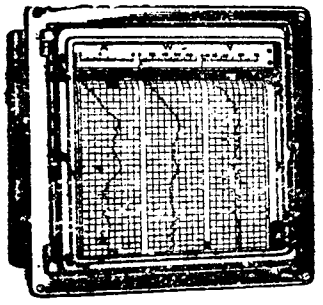


KABEL- & GUMMIWERKE A. G.
EUPEN БЕЛЬГИЯ

Trüb, Täuber & Co. A.G.
ФАБРИКА ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ И НАУЧНЫХ АППАРАТОВ
ZÜRICH. 10, Ampèrestr. 3 (Швейцария)

САМОПИШУЩИЕ ИНСТРУМЕНТЫ для ОДНО- и МНОГОКРАТНЫХ ЗАПИСЕЙ,

переносные для включения в распределительные доски с полосами бумаги для записей шириной в 70 мм., 150 мм. или 300 мм.



Тройной самопишущий ампер-, ватт- и вольтметр для включения в распределительную доску

МЫ ЯВЛЯЕМСЯ ПОСТАВЩИКАМИ ТЕХНОПРОМИМПОРТА, МОСКВА

POUR TOUTES QUESTIONS DE PUBLICITÉ EN **U.R.S.S.**
PRIÈRE DE S'ADRESSER A:

INREKLAMA
(Service de Publicité)
Agence Générale pour la:
FRANCE — ANGLETERRE
BELGIQUE—HOLLANDE—SUISSE
79, Avenue des Champs-Élysées,
Paris (VIIIe), France
Téléph. : Élysées 05-21

VOUS RECEVREZ TOUS LES RENSEIGNEMENTS QUE VOUS DÉSIREZ, AINSI QUE — GRATUITEMENT ET SANS FRAIS — TOUS LES SPÉCIMENS DES ÉDITIONS TECHNIQUES DE L'U.R.S.S. QUI PEUVENT VOUS INTÉRESSER AU POINT DE VUE PUBLICITÉ, NOS TARIFS DE PUBLICITÉ, ETC...

NOS BUREAUX SUS-MENTIONNÉS SONT A VOTRE DISPOSITION

Выписка заграничных товаров может последовать лишь на основании действующих в СССР правил о монополии внешней торговли.

Цена 2 р. 75 к.

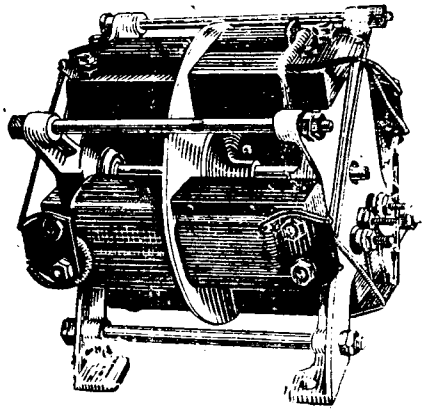
п. 53 г. 56

"Высокая эффективность в работе—залог популярности"

Ввиду высокой эффективности в работе, регуляторы напряжения с вращающейся катушкой приобрели у многих фирм отличную репутацию, и непрерывное поступление повторных заказов объясняется

Снижением расходов по распределению тока Регулятор напряжения с вращающейся катушкой дал возможность отказаться от применения тяжелых кабелей и от нежелательного увеличения числа подстанций, равно как и способствовал разрешению других проблем распределения тока.

Простотой конструкции В конструкции отсутствуют выключатели, гибкие свинцовые или переходящие контакты. Регулятор приводится в действие тихоходным мотором с медным диском, не требующим никакого обслуживания. Автоматический орган управления отличается исключительной простотой.

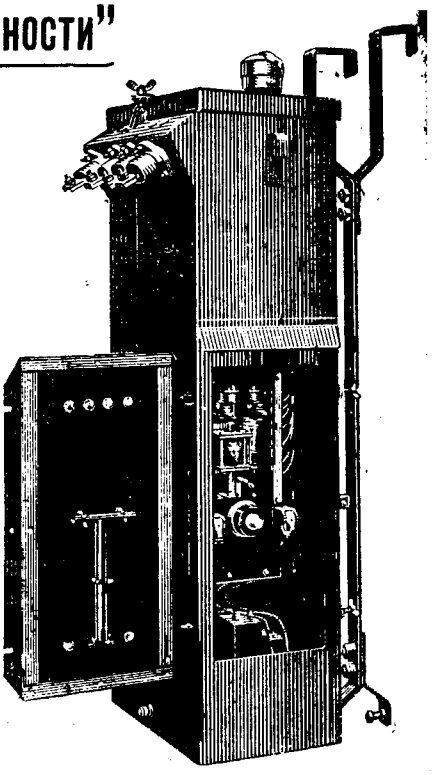


Дешевой стоимостью и надежностью

Эти достоинства делают возможным установку большого числа регуляторов с вращающейся катушкой в разветвленных системах распределения тока.

Применимостью в промышленности

На многих промышленных предприятиях снижение издержек производства достигается поддержанием напряжения тока на одном и том же уровне. Регулятор напряжения с вращающейся катушкой дает при желании также возможность точно изменять напряжение тока.



ТРЕБУЙТЕ НАШИ ПРОСПЕКТЫ

FERRANTI **Регулятор напряжения с вращающейся катушкой**

FERRANTI LIMITED, HOLLINWOOD, LANCS, Англия

F.T.35b

Выписка заграничных товаров может последовать лишь на основании действующих в СССР правил о монополии внешней торговли.

УРАЛЬСКИЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ
им. С. М. КИРОВА

ИНСТИТУТ ИМЕЕТ ФАКУЛЬТЕТЫ:

1. Металлургический, 2. Энергетический, 3. Механический. 4. Химико-технологический, 5. Инженерно-экономический и 6. Строительный.

ЗАЯВЛЕНИЯ ПРИНИМАЮТСЯ С 1 ИЮНЯ ПО 1 АВГУСТА. НАЧАЛО ЗАНЯТИЙ — 1 СЕНТЯБРЯ.

Поступающие на 1-й курс подвергаются приемным испытаниям согласно правилам приема во ВТУЗы.
Одновременно объявляется прием аспирантуры по 25 основным кафедрам указанных факультетов.
Институту предоставлено право приема кандидатских диссертаций и присуждения ученой степени кандидата наук.

ПИСЬМА, ЗАЯВЛЕНИЯ И ДОКУМЕНТЫ ПОСЫЛАТЬ ПО АДРЕСУ: г. Свердловск, ВТУЗ-городок, 1-й учебный корпус.

ДИРЕКЦИЯ