

1932

„Коммунизм — есть советская власть
и электрификация всей страны“
ЛЕНИН

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

№ 7

АПРЕЛЬ

В Ы П У С К



МОСКВА
ЛЕНИНГРАД

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ
ИЗДАТЕЛЬСТВО

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ПРИНИМАЕТСЯ ПОДПИСКА на 1932 год

НА ЖУРНАЛЫ

„ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“

Год издания 52-й

Двухнедельный орган электроэнергетических учреждений и организаций ВЭО, Энергоцентр ВСНХ СССР и ВЭИ

В группе энергетических журналов СССР „Электричество“ является основным руководящим научно-технич. органом, рассчитанным на квалифицированных работников электрохозяйства.

ПРОГРАММА ЖУРНАЛА: Генеральный план электрификации СССР. Электроэнергетика капиталистических стран. Социалистическая реконструкция и проблемы экономики электрохозяйства СССР. Теоретические проблемы электротехники. Единая высоковольтная сеть Союза. Электромашиностроение. Электрификация промышленности, сельского хозяйства, транспорта. Электротехнические кадры. Вопросы рационализации, стандартизации и нормализации электрохозяйства.

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА: на 12 мес.—18 р., на 6 мес.—9 р., на 3 мес.—4 р. 50 к. **Льготная—** при коллективной подписке (не менее 10 экз.): на 12 мес.—15 р., на 6 мес.—7 р. 50 к., на 3 мес.—3 р. 75 к.

Каждый рабочий, техник, инженер, занятый в электрохозяйстве СССР, обязан стоять на высоте современных технических знаний

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ЖУРНАЛ

„СВЕТОТЕХНИКА“

Орган Всесоюзного электротехнического объединения и Всесоюзной ассоциации светотехнических лабораторий

ЗАДАЧИ: подвергать широкому обсуждению вопросы теорет. и прикладн. светотехники, способствовать развитию светотехнической промышленности, вести популяризацию знаний в области светотехники и рационализации светового хозяйства СССР.

ОТДЕЛЫ: Научно-технические статьи. Светотехническая промышленность и световое хозяйство. Нормы и стандарты. Хроника. Рефераты. Светотехника в массы. Библиография. Журнал рассчитан на инженеров, студентов, квалифицированных монтеров и мастеров.

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА: На год—8 р., на 6 мес.—4 р. Цена отдельного номера—1 р.

Подписка принимается во всех отделениях и магазинах Книгоцентра, всюду на почте и письмоносцами

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

7
АПРЕЛЬ
1932

Орган Всесоюзного электротехнического объединения (ВЭО), Всесоюзного объединения энергетического хозяйства (Энергоцентр) Секции технической реконструкции и электрофикации Института техники и технической политики Коммунистической академии ЦИК СССР и Всесоюзного энергетического комитета (ВЭН)

Адрес редакции:

МОСКВА, Ильинка, Ипатьевский пер., д. 2, 1-й этаж. Телеф. 72-46 и 1-57-19

Содержание

	Стр.		Стр.
<i>Передовая</i> —Задачи советского электромашиностроения во второй пятилетке	381	<i>Н. Ф. Гонек и Гороян</i> —Современные автоматические регуляторы	415
<i>К. И. Шенфер</i> —Технические сдвиги в электромашиностроении СССР и капиталистических стран	384	<i>Л. П. Подольский</i> —Нужно ли заземлять нейтраль в установках низкого напряжения	419
<i>Б. П. Апаров и В. М. Лавров</i> —Современные тенденции в развитии высоковольтных синхронных генераторов и способов их защиты	393	<i>А. М. Залесский</i> —Аналитический расчет установившегося тока короткого замыкания	421
<i>Н. П. Иванов</i> —Новое в вентиляции турбогенераторов	400	<i>И. Маркович</i> —Графический способ определения измерения токов короткого замыкания в течение переходного процесса	425
<i>А. Зильберталь</i> —Выбор мощности и количества подстанций для трамваев	404	<i>Из книг и журналов</i>	427

Задачи советского электромашиностроения во второй пятилетке

Выполнение директивы XVII Конференции ВКП(б) о доведении выработки электрической энергии в конце второй пятилетки до 100 млрд. kWh должно быть обеспечено необходимым по темпу и по качеству развертыванием электропромышленности и, в первую очередь, ее основной и ведущей части—советского электромашиностроения.

Советская электропромышленность в течение первой пятилетки добилась огромных количественных и качественных успехов, которые дали ей право рапортовать партийной конференции о выполнении пятилетнего плана в три года. Объем производства электропромышленности в 1931 г. в 10 раз превысил довоенный уровень, а за последние три года вырос в пять раз¹.

Быстрыми темпами шло развитие и электромашиностроения, занимающего по своему удельному весу в общем объеме продукции электропромышленности важнейшее место. Во второй пятилетке советскому машиностроению и, в частно-

сти, электромашиностроению предстоит крупная и ответственная задача. „Основной и решающей хозяйственной задачей второй пятилетки является завершение реконструкции всего народного хозяйства, создание новейшей технической базы для всех отраслей народного хозяйства.

Ведущая роль в завершении технической реконструкции принадлежит советскому машиностроению. Конференция считает необходимым увеличить продукцию машиностроения к концу пятилетки не менее чем в 3—3½ раза против 1932 г. с тем, чтобы все потребности реконструкции промышленности, транспорта, связи, сельского хозяйства, торговли и т. п. были обслужены внутренним производством наиболее совершенных и современных машин“ (из резолюции XVII Конференции ВКП(б) по докладам тт. Молотова и Куйбышева).

На электрических машинах базируется в настоящее время производство энергии (электрические генераторы), на них же базируется и основное ее потребление в промышленности, сельском хозяйстве и на транспорте (электрические двигатели). Чтобы создать крепкую техни-

¹ Рапорт электропромышленности XVII Конференции ВКП(б). „Электричество“, № 3, 1932.

ческую базу для электрификации, необходим еще более мощный рост производства электрических машин, чем это имело место до сих пор.

В итоге первой пятилетки производство электрических машин в СССР сделало огромный шаг вперед. Полукустарные заводы-мастерские, приспособленные, главным образом, для сборки электрических машин из частей, ввозимых из-за границы, в результате коренной реконструкции и расширения превратились в крупнейшие советские заводы, стоящие в техническом отношении на уровне лучших зарубежных предприятий. В стенах этих заводов идет развернутая и успешная борьба за овладение передовой техникой, конструирования и производства электрических машин. Из месяца в месяц рабочие и инженерно-технический персонал электромашиностроительных заводов: „Электросила“, ХЭМЗ, „Динамо“, им. Лепсе, „Ревтруд“ и „Вольта“ под руководством партийных организаций завоевывают новые и новые технические высоты.

Первая пятилетка положила начало крупному советскому электромашиностроению. Выпустив в 1928 г. первый турбогенератор в 10 тыс. kW, завод „Электросила“ в 1929 г. строит турбогенератор мощностью в 24 тыс. kW, 3000 об/мин, а в 1931 г. уже ставит на Каширской гЭС первый советский четырехполюсный турбогенератор в 50 тыс. kW. Удачный опыт постройки на том же заводе в 1927 г. крупных генераторов для Волховской и Земо-Авчальской электростанций открыл возможности для выполнения в 1931 г. сверхмощных гидрогенераторов для Днепровской гЭС, мощностью в 62 тыс. kW в одной единице, являющихся крупнейшими машинами этого рода в мире.

Завод ХЭМЗ (Харьков) освоил производство быстроходных гидрогенераторов, первые из которых идут для Дзорогэса и Гизельдана. Строящиеся быстроходные гидрогенераторы по своим техническим характеристикам в значительной степени превосходят продукцию крупнейших европейских капиталистических фирм. Вновь создаваемые металлургические гиганты предъявили требование на электрическое оборудование для мощных прокатных станов блюмингов. Несмотря на чрезвычайно короткий срок — один год, данный для производства этого электрооборудования заводу „Электросила“, — он выполнил это задание досрочно, выстроив в числе других машин асинхронный двигатель в 5 тыс. kW. На ХЭМЗ заканчивается производством синхронный двигатель в 10 500 kVA для Алуминстроя. Завод „Динамо“ специализируется на производстве тягового электрооборудования, никогда ранее не изготовлявшегося в СССР. Московский завод им. Лепсе недавно выпустил пробную партию электроверетен на 10 тыс. об/мин для производства искусственного волокна.

Наряду с освоением новых производств идет усиленная работа над усовершенствованием типов машин, облегчением их веса, повышением электрических и эксплуатационных характеристик. Последние типы асинхронных двигателей, разработанные советскими конструкторами, по своим технико-экономическим показателям не только догоняют, но и перегоняют лучшие образцы европейских капиталистических фирм.

В производство электротехнических машин внедряются новые технологические методы, упрощающие и удешевляющие производство и вместе с тем обеспечивающие высокое качество изделий. Так например, замена литья целого ряда крупных деталей машин сваркой тотчас же сказалась значительным облегчением веса конструкции, ускорением процесса производства и снижением себестоимости.

Одновременно с реконструкцией и расширением старых предприятий растут и новые гиганты электромашиностроения. В ближайшие месяцы вступает в строй Харьковский турбозавод, запроектированный для серийного производства турбин и генераторов мощностью в 50–100 тыс. kW в одной единице. Разработан проект и приступлено к постройке величайшего в мире электропромышленного комбината — Уралэлемашстроя, рассчитанного на ежегодный выпуск продукции в сотни миллионов рублей.

Но эти огромные достижения, с которыми советское электромашиностроение приходит к концу первой пятилетки, не могут и не должны закрывать от нас факта недопустимого отставания производства электрических машин от требований, предъявляемых ему быстро развивающимся электростроительством и широко развешиваемой электрификацией промышленности, транспорта и сельского хозяйства. Достаточно сказать, что электропромышленность удовлетворяет потребности страны только на 50%, а недостаток в значительной мере покрывается за счет импорта. Советская электрификация должна целиком базироваться на советских машинах и на советской аппаратуре, и поэтому производственная база электромашиностроения как ведущей отрасли электрохозяйства должна быть значительно расширена. Продолжая техническую реконструкцию существующих электромашиностроительных заводов и осуществляя без опоздания намеченное строительство новых мощных заводов-комбинатов, мы должны во второй пятилетке решить задачу полного освобождения от иностранной зависимости (прекращение импорта) и полного удовлетворения советским производством потребности народного хозяйства в электрических машинах.

К крупнейшим недостаткам советского производства электрических машин, которые имеют место в настоящее время и на борьбу с которыми должно быть мобилизовано внимание рабочих и инженерно-технических работников электромашиностроительных заводов, необходимо отнести: а) сильное запаздывание в сроках поставки готового электрооборудования для промышленных предприятий, часто ведущее к задержке пуска новых заводов и фабрик; б) некомплектность поставляемого оборудования; в) отсутствие выпуска необходимых промышленности и транспорту в данный момент машин, в частности — тяговых мощных двигателей, синхронных двигателей и компенсирующих устройств.

Опыт 1931 г. с особой остротой подчеркнул всю слабость самой организации и планирования производства. Недостаточное развитие сырьевой базы, отсутствие должной производственно-технической подготовки к введению новых произ-

водств, плохая постановка внутризаводского планирования и использования рабсилы, и, наконец, непроведение с необходимой настойчивостью и упорством шести указаний т. Сталина привели в 1931 г. к серьезным производственным прорывам на ряде электромашиностроительных заводов (особенно на заводе „Динамо“), и в итоге промфинплан по выпуску электрических машин в 1931 г. был выполнен только на 76,5%. Этот прорыв должен быть полностью компенсирован электромашиностроительными заводами перевыполнением производственного плана 1932 г.

Во втором пятилетии в области производства и применения электрических машин наряду с огромным количественным ростом должны произойти и большие качественные технические сдвиги.

Строительство крупных районных электрических станций, объединение их на параллельную работу в высоковольтные кольца, а впоследствии и в единую высоковольтную сеть, единицы синхронных генераторов. Во второй пятилетке такие мощности турбинных генераторов, как 24, 50, 100 тыс. kW в одной единице, будут уже стандартными. Металлургические гиганты требуют уже теперь особо мощных электрических двигателей в 10 и выше тысяч kW. Химические комбинаты будут нуждаться в крупнейших генераторах постоянного тока. Удовлетворение этих требований повлечет за собой для электропромышленности переход к крупному электромашиностроению.

Что касается моторостроения, то здесь необходимо будет учитывать решительное распространение в качестве основных электрических приводов в промышленности асинхронных короткозамкнутых двигателей для малых и средних мощностей и синхронных двигателей для крупных мощностей, что диктуется наиболее рациональным и экономичным использованием электрической энергии и поддержанием высокого коэффициента мощности. Основная тенденция современного развития конструкций электрических двигателей выражается в максимальном приближении их к рабочим орудиям и в некоторых случаях даже в органическом слиянии электрического двигателя с рабочей машиной, а также в приспособлении к автоматическому управлению.

На этом пути решается основная задача социальной реконструкции промышленности—задача создания автоматического производства во всех отраслях промышленности.

Конструкции электрических двигателей должны также в полной мере удовлетворять требованиям их массового, серийного производства и стандартизации—этим обязательным принципам успешного развития советского электромашиностроения.

Серьезной технической задачей в области электромашиностроения будущей пятилетки является проблема материалов, конкретно сводящаяся к замене остродефицитной меди другим, более дешевым, материалом, каким является, например, широкое применение немагнитного чугуна, радикальные изменения в изолирующих материалах и т. д.

Алюминий уже теперь успешно заменил медь в роторах асинхронных двигателей с короткозамкнутой обмоткой малой мощности, где он прямо заливается в приготовленные для него пазы, что помимо экономии значительно ускорило и удешевило самый процесс производства.

Применение алюминия для обмотки возбуждения крупных быстроходных турбогенераторов решает проблему значительного повышения предельной мощности машин. Правда, на этом пути встретились некоторые затруднения производственного характера, но они в ближайшее время, несомненно, будут преодолены. Есть все основания считать, что алюминий займет в будущем преобладающее место среди проводникового материала в электромашиностроении.

Во второй пятилетке будет введен целый ряд производств новых типов специальных электрических машин, удовлетворяющих требованиям, в первую очередь, решающих отраслей народного хозяйства: металлургии, угля, машиностроения и железнодорожного транспорта.

Задача рационализации электросилового хозяйства и наиболее эффективного использования существующего электрооборудования требует выпуска компенсирующих устройств, повышающих коэффициент мощности электрических установок.

Наряду с количественным ростом и развертыванием новых производств вторая пятилетка предъявит требования относительно высокого качества продукции и значительного снижения себестоимости.

Продолжая критически осваивать технический опыт передовых капиталистических стран, мы должны будем перейти к разработке своих советских типов и конструкций электрических машин, в полной мере удовлетворяющих социалистическое хозяйство в смысле высокого качества и экономичности как в производстве, так и в эксплуатации.

Быстрый темп развития советского электромашиностроения требует правильной организации широко поставленной научно-исследовательской работы. Наиболее быстрое освоение научных и технических достижений за границей, изучение и обобщение накопившегося у нас опыта отечественного производства электрических машин, а также серьезное и критическое изучение конструкций и опыта эксплуатации, работающих у нас на станциях и заводах машин, являются обязательными условиями дальнейшего роста советского электромашиностроения. Это вместе с тем даст огромный материал, на базе которого должна развернуться глубокая теоретическая и лабораторная исследовательская работа по созданию своих советских типов и конструкций. Для электромашиностроительных заводов при конструировании того или иного типа машин немаловажным фактором являются условия, в которых будут работать данные машины и те требования, которые предъявляются к ним со стороны производства. Только путем глубокого изучения электрифицируемых отраслей народного хозяйства электропромышленность сумеет правильно

удовлетворить их нужным электрооборудованием. Систематическую проверку на практике выпущенных электрических машин, выявление недостатков и новых требований к ним должны взять на себя научно-исследовательские институты и заводские исследовательские лаборатории.

Целый ряд крупнейших технических проблем, выдвигаемых развернутым планом социалистического строительства: единая высоковольтная сеть, постройка сверхмощных генераторов и специаль-

ных машин, революция в самом электроприводе и т. п.,—требует от научно-исследовательских институтов и заводских лабораторий своего на-иболее правильного решения.

На основе директив хозяйственного плана для второй пятилетки необходимо немедленно же приступить к составлению технического плана, отражающего в себе в полной мере конкретную техническую политику партии в области электромашиностроения.

ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОМАШИНОСТРОЕНИЯ

Технические сдвиги в электромашиностроении СССР и капиталистических стран

К. И. Шенфер

ВЭИ

XVII конференция ВКП(б) со всей четкостью подчеркнула, что „ведущая роль в завершении технической реконструкции принадлежит советскому машиностроению“. Электромашиностроение является одним из важных участков всего советского машиностроения в целом.

На основе критического изучения современных технических сдвигов и использования лучших достижений электромашиностроения капиталистических стран мы должны обеспечить полное освобождение советского электромашиностроения от иностранной зависимости, чтобы завоевать для СССР во второй пятилетке первое место в Европе в техническом отношении.

I. Синхронные машины

Возрастание мощности. Растущая из года в год мощность электрических станций влечет за собой соответственное увеличение мощности установленных на станциях генераторных единиц.

Представление о той скорости, с которой происходит возрастание мощности отдельных машин, можно получить на основании данных, взятых из доклада американского инженера Savage на последней Мировой энергетической конференции (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Год	Тип	Мощность кВА	Число об/мин	Частота пер/сек	Напряже- ние V	Удельный вес кг/кВА
1925	Одноротор- ный	50 000	1 800	60	13 800	—
1926	"	60 000	1 500	25	13 000	—
1927	"	60 000	1 800	60	14 000	—
1928	"	90 000	1 500	50	18 500	—
1929	Тройной	200 000	1 800	60	22 000	—
1929	Одноротор- ный	160 000	1 500	25	11 400	—
1930	"	90 000	1 500	50	16 500	—
1930	"	45 000	3 000	50	—	2,5
1930	"	88 500	1 800	60	—	2,25
1930	"	100 000	1 500	50	—	2,35

Можно здесь привести следующие известные соображения, которые говорили в пользу увеличения мощности генераторных единиц.

Экономия места. Если место, занимаемое всем турбогенератором (т. е. турбиной и генератором), скажем, на 16 000 кВА, характеризуется величиной 18 м² на каж-

дые 1 000 kW, то при мощности в 80 000 kW эта величина уже падает до 5,5 м² на каждые 1 000 kW агрегата.

В е. с. Вес, приходящийся на единицу мощности, падает с возрастанием мощности. Так например, для агрегата в 16 000 kW мы получаем суммарный удельный вес для турбины и генератора в 18,5 kg/kW и для 80 000 kW удельный вес 13 kg/kW.

Экономия на обслуживающем персонале и улучшении щитового устройства также возрастают с увеличением мощности единиц, так как последнее, естественно, влечет за собой уменьшение общего числа машин на станции при той же мощности последней.

Предельная мощность. Максимально допускаемое напряжение материала в роторе, условия транспорта и монтажа отдельных частей ограничивают предельную мощность машины. Верхний предел окружной скорости ротора в настоящее время можно принять в 150 м/сек, что при повышении скорости на 25% выше нормальной, предписываемой нормами, дает максимально допускаемую скорость в 190 м/сек.

Возможность построения генераторов большой мощности главным образом, ограничена не статором, но ротором. Технологические затруднения, связанные с возможностью надежной паковки, растут с увеличением размеров ротора.

Напишем хорошо известное из курсов синхронных машин уравнение, связывающее мощность машины в киловольтамперах с ее основными размерами: диаметром D , длиной l и числом оборотов в минуту n :

$$\frac{D^2 l n}{P_{\text{кВА}}} = \frac{6 \cdot 10^{11}}{k \alpha_i B_l AS}$$

В последней формуле означают:

B_l — максимальная магнитная индукция в воздушном зазоре,

AS — линейная нагрузка статора,

α_i — коэффициент формы кривой магнитного поля,

k — коэффициент э. д. с.

D и l — диаметр и длина машины в см.

Полагая в вышенаписанном уравнении в среднем $\alpha_i = 0,65$, $k = f v f w = 1,11 \cdot 0,9 = 1,07$ и выражая диаметр D через окружную скорость v ,

$$D = \frac{60 v}{\pi n}$$

перепишем основное уравнение в следующем виде:

$$P_{\text{кВА}} = \frac{l B_l AS v^2}{n} 42 \cdot 10^{-5}, \quad (1)$$

где v выражено в метрах в секунду.

Из уравнения (1) найдем:

$$\frac{P_{\text{кВА}}}{l} = \frac{B_l AS v^2}{n} 42 \cdot 10^{-5}. \quad (2)$$

В левой части этого выражения стоит мощность машины, приходящаяся на 1 м длины.

1 См. Gesamtbericht „2. Weltkraftkonferenz“, стр. 43. Таблица приводится здесь в сокращенном виде.

Подставляя в выражение (2) следующие значения: $n = 3\,000$, $B_1 = 7\,200$, $AS = 650$, $v = 150$ m/sec (что соответствует диаметру в 950 mm), получим:

$$\frac{P_{\text{[kVA]}}}{l} = \frac{7\,200 \cdot 650 \cdot 150^2}{3\,000} = 15\,000 \text{ kVA/m.} \quad (3)$$

Мы видим, что выбирая приведенные выше расчетные данные, мы можем построить синхронную машину, которая при $n = 3\,000$ об/мин будет давать на каждый метр осевой длины мощность, равную 15 000 kVA. Таким образом, задаваясь длиной ротора $l = 6$ m, мы можем построить двухполюсный генератор мощностью в $15\,000 \cdot 6 = 90\,000$ kVA.

Применяя вместо медной алюминиевую обмотку в роторе, мы можем повысить окружную скорость ротора до 170 m/sec, что даст возможность повысить мощность машины, приходящуюся на 1 m длины, до значения $15\,000 \cdot \frac{170}{150} = 17\,000$ kVA.

Таким образом, применяя ротор с длиной $l = 6$ m, найдем предельную мощность для машины с алюминиевой обмоткой в роторе $17\,000 \cdot 6 = 102\,000$ kVA.

Имея в виду четырехполюсный тип, при котором получается $n = 1\,500$ об/мин, найдем на основании уравнения (2) мощность, приходящуюся на 1 m длины (в случае медной обмотки ротора):

$$\frac{P_{\text{[kVA]}}}{l} = \frac{7\,200 \cdot 650 \cdot 150^2}{1\,500} = 30\,000 \text{ kVA/m.}$$

Диаметр якоря при окружной скорости $v = 150$ m/sec будет для четырехполюсного типа больше в два раза, чем для двухполюсного типа: $2 \cdot 950 = 1\,900$ mm.

Выбрав длину $l = 8$ m, получим предельную мощность четырехполюсной машины:

$$P = 30\,000 \cdot 8 = 240\,000 \text{ kVA.}$$

Вес ротора такой гигантской машины должен быть равен примерно 225 t.

В настоящее время последняя рекордная цифра почти достигнута. Так например, американский завод ГЕС уже построил два года тому назад для Эдиссоновской станции близ Нью-Йорка однороторный четырехполюсный генератор на $f = 25$ пер/сек, $n = 1\,500$ об/мин и $P = 160\,000$ kVA.

Строится еще более мощная машина для Бруклинской станции на 200 000 kVA и $n = 1\,500$ об/мин.

Что касается турбогенераторов на 3 000 об/мин, то машина мощностью в 90 000 kVA в настоящее время уже построена заводом „Oerlikon“ в Швейцарии.

Необходимо здесь, однако, отметить, что при возрастании длины машины возрастают также и затруднения в связи с тем обстоятельством, что коэффициенты теплового расширения медных обмоток и железа ротора и статора, в пазах которых заложены провода обмоток, неодинаковы и стносятся в среднем, как 1,5:1. При алюминиевой обмотке это отношение получается еще большим. Вследствие вышеуказанного при нагреве машины неизбежны перемещения обмоток относительно железа пазов, что должно вредно отражаться на изоляции. Поэтому в последнее время ведутся изыскательные работы, направленные на поиски изолирующих веществ и клея, отличающихся достаточной пластичностью и выносящих высокие градиенты потенциала.

Ротор. Ротор является той частью машины, которая, главным образом, ограничивает верхний предел мощности, на который может быть построена синхронная машина.

Максимально допускаемая окружная скорость ротора v , и, следовательно, его диаметр D_r ограничиваются условиями крепости материала.

Таким образом дальнейший прогресс в смысле возможного возрастания предельной мощности машин связан, главным образом, с улучшением технологических и линейных процессов при изготовлении ротора.

Для получения достаточно надежной работы машины требуется ротор хорошо, прокованный, и если нужно, подвергнутый определенной термической обработке, обладающий хорошими магнитными свойствами и обладающий достаточной крепостью и вязкостью.

При охлаждении громадного (весом во много десятков тонн) железного цилиндра после предварительного нагрева иковки могут возникнуть внутренние напряжения в металле ротора. Причина возникновения опасных внутренних напряжений в теле ротора лежит в неравномерном охлаждении всей громадной массы ротора после его предварительного

нагрева. Эта неравномерность охлаждения усугубляется тем фактом, что диаметр шеек вала и ротора значительно отличаются друг от друга по величине и после предварительного нагрева охлаждаются с разной скоростью.

Ввиду этого роторы очень больших машин теперь делаются часто составными; такие роторы обычно состоят из трех частей: из центральной поллой цилиндрической части (так называемой „бочки“) и двух фланцев с цапфами, привертываемых при помощи болтов. При мощности генераторов, не превосходящей 50 000 kVA при $n = 3\,000$ об/мин, роторы обычно делаются из одного куска. При больших мощностях роторы выполняются обычно составными.

В предположении, что каждый готовый ротор турбогенератора должен выдержать испытание на повышенную скорость по большей части равную 1,25 от нормальной, механический расчет ротора ведется таким образом, чтобы максимальное напряжение материала не превосходило 60% от предела текучести.

Для „выдобренной“ хромоникелевой стали удастся повысить предел текучести до 50—56 kg/mm², в то время как для обычной никелевой стали эта цифра получается меньшей, примерно 37 kg/mm².

Однако при такой закалке в масле возникает опасность появления в металле внутренних напряжений. Поэтому в настоящее время замечается тенденция отказа от „выдобренной“ хромоникелевой стали и перехода к обыкновенной никелевой стали. В табл. 2 даны характеристики этих двух сортов стали.

Таблица 2

	Никелевая сталь	Молибдено-хромоникелевая сталь („выдобренная“)
Временное сопротивление на разрыв (kg/mm ²)	65	70
Предел текучести (kg/mm ²)	37	50
Удлинение (%)	16	18

Изготавливая ротор из высококачественной хромоникелевой стали и желая учесть те внутренние добавочные напряжения которые могут возникнуть в металле при закалке в масле приходится делать скидку примерно в 20% от гарантированной цифры предела текучести, т. е. другими словами, вместо 50 kg/mm² приходится принимать в расчет только цифру примерно в 40 kg/mm².

Допуская коэффициент надежности равным 2, мы видим, что максимально допустимое напряжение материала в роторе турбогенератора, вращающегося с нормальной скоростью, не должно в среднем превосходить примерно величины в 20 kg/mm².

Ввиду этого, как было уже сказано выше, в настоящее время чаще применяется для роторов „отпущенная“ (незакаленная) сталь.

„Колпаки“ для укрепления торцевых частей обмотки ротора являются обычно самой напряженной механически частью ротора. Эти „каппы“ (как их иногда называют) изготавливаются в большинстве случаев из немагнитной стали с временным сопротивлением на разрыв 65 ÷ 75 kg/mm². При нормальной скорости механические напряжения в капках не должны превосходить значений 25 ÷ 30 kg/mm², что соответствует коэффициенту надежности, равному 2,5.

Применение для обмотки ротора более легкого металла, чем медь, — алюминия, — уменьшает механические напряжения в капках и зубцах ротора, что позволяет допускать при алюминиевой обмотке более высокие окружные скорости на периферии ротора.

В роторах генераторов с $n = 3\,000$ об/мин мощностью 100 000 kVA в случае применения медной обмотки максимальная окружная скорость может быть допущена 140 m/sec, в случае же применения алюминиевой обмотки эта скорость может быть повышена до 170 m/sec.

Этим скоростям соответствует диаметр ротора $D_r = 90$ см для медной обмотки и 110 см для алюминиевой.

* По данным проф. Dünner заказ на такой генератор принят швейцарским заводом „Oerlikon“ (см. „Association Suisse des Electriciens“, Bulletin, 1931 г., № 8). Мощность этой машины равна 102 500 kVA при $n = 3\,000$ об/мин, $E = 15\,000$ V, вес 180 t.

* Процесс „выдабривания“ (Vergütung) хромоникелевой стали заключается обычно в том, что сталь, подвергнутая предварительному нагреву, затем отпускается в масле в несколько приемов. См. статью Н. Ф. Перескокова, Эл.-ро, 1930, № 23—24.

* См. „Bericht“, стр. 80.

* См. Е и М., 1932, № 4.

Подсчеты показывают, что при этих скоростях пучок алюминиевых проводов, заложенных в паз, вследствие центробежной силы давит на клин с силой, соответствующей примерно 120 kg/cm^2 или 120 ат . При медных обмотках эти значения получаются значительно больше.

Для испытания доброкачественности роторных поковок и обнаружения возможных дефектов обычно приходится просверливать в теле ротора осевое цилиндрическое отверстие.

К сожалению, такое отверстие влечет за собой повышение напряжения в теле ротора. В точках, прилегающих к поверхности внутренней цилиндрической поверхности ротора, напряжение материала повышается при этом примерно в 2 раза и более. Однако на такое повышение напряжения материала

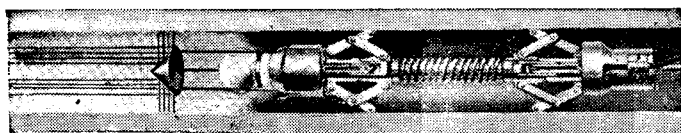


Рис. 1

приходится идти, желая проконтролировать качество материала внутри ротора. Наблюдение внутренней цилиндрической поверхности с целью обнаружения различных возможных дефектов (трещин, раковин и т. п.) ведется при помощи особого зеркального аппарата, устройство которого поясняет рис. 1.

На этом рисунке показано внутреннее цилиндрическое отверстие, просверленное в теле ротора, в котором находится небольшая лампочка накаливания аппарата. Лучи света лампочки, освещающие внутреннюю цилиндрическую поверхность расточки, дают возможность наблюдать (при помощи подзорной трубы, не показанной на рис. 1) зеркальную поверхность конуса, в которой отражаются стенки расточки. Двигая аппарат вдоль расточки, можно, таким образом, проверить качество материала ротора.

На рис. 2 показана другая схема испытания, позволяющая обнаружить дефекты в поковке ротора.

Пропуская постоянный ток $I = 2000 \div 3000 \text{ А}$ от аккумуляторной батареи B и производя замыкание и размыкание рубильника S , мы можем обнаружить в роторе дефект (в виде, например, раковины, схематически показанной на чертеже справа) по отклонению гальванометра G , соединенного со шпудлей W . При несимметричном распределении токов ($i_1 - i_2$) внутри ротора, вызванном наличием дефекта, в шпудле W будет наводиться э. д. с., которая послужит причиной отклонения гальванометра G .

Статор. При таких колоссальных мощностях, на которые в настоящее время строятся генераторы электрической энергии, вопрос о потерях и к. п. д. приобретает одно из важнейших значений.

Так называемые добавочные потери вследствие вихревых токов в меди обмотки статора могут в значительной степени влиять на к. п. д. машины. При больших сечениях обмотки эти потери в меди могут достигнуть такого большого значения, что могут превысить джоулевские потери, рассчитанные по омическому сопротивлению постоянного тока, в 3—4 раза.

Для уменьшения потерь на вихревые токи в проводах статора обычно применяется так называемая „транспозиция“ (перевивка) проводов. Для этой цели каждый из проводов разбивается на ряд параллельных проводов меньшего сечения, причем цилиндрическая „перевивка“ производится не только в части проводов, лежащих в пазах, но также и в торцевых частях обмотки.

Для уменьшения высших гармоник в кривой м. д. с. статора (в особенности, кратных шести), которые служат причиной появления дополнительных потерь на токи Фуко в поверхностном слое железа ротора, в настоящее время применяются обмотки статора с укорочением шага, дающие кривую м. д. с., приближающуюся к синусоиде.

Эта мера, а равно и большой воздушный зазор, даже при тех значительных линейных нагрузках якоря (доходящих до $AS = 700$), которые допускаются в современных больших машинах, дает возможность снизить добавочные нагрузочные потери примерно до 1%.

Потоки рассеяния, создаваемые торцевыми частями статорной обмотки, иногда могут все же наводить большие „вихревые“ токи в металлических колпаках ротора, перегревая последние. В особенности большим бывает нагрев этих колпа-

ков при несимметричной нагрузке статора генератора. Во избежание этого в настоящее время эти колпаки, или каппы, изготавливаются из немагнитной (или вернее, слабомагнитной) стали.

Из немагнитной стали изготавливаются также и нажимные диски, при помощи которых пресуется железо статора.

Для уменьшения потерь на токи Фуко статор современных мощных турбогенераторов обычно набирается из сильно легированного железа.

При тех громадных значениях магнитных потоков, с которыми мы имеем дело в современных мощных турбогенераторах, теперь иногда приходится встречаться с такой опасностью, грозящей машине, на которую раньше мало обращали внимания.

Дело в том, что при случайной порче изоляции между смежными железными листами статора, главным образом, вблизи зубцов, железо в этих местах вследствие появления местных токов начинает сильно разогреваться; такой местный перегрев может повлечь за собой аварию: повреждение изоляции в пазах и соединение на землю и даже короткое замыкание статорной обмотки. Явление такого местного перегрева железа вследствие порчи изоляции носит иногда образное название „железной болезни“ генератора (Eisenkrankheit).

Во избежание такой „железной болезни“ необходимо при изготовлении машины весьма внимательно следить за тщательностью изоляции железных листов статора. Весьма желательна вышеописанный дефект, если он случается, обнаружить еще до закладки проводов обмотки статора в пазы; для этой цели обычно на заводе железо статора турбогенератора подвергают так называемому „кольцевому“ намагничиванию переменным током, что дает возможность предварительно обнаружить слабые места междудюстовой изоляции.

Пазы в современных мощных генераторах выполняются почти всегда открытыми, что облегчает закладку секций обмотки в паз без порчи изоляции.

Для уменьшения добавочных потерь на вихревые токи в проводах обмотки статора обычно при расчете избегают допускать большие магнитные насыщения в зубцах статора.

Пазы статора часто выполняются с увеличенной глубиной, так что обмоткой бывает занята только часть высоты паза. Такая конструкция имеет двоякую цель: во-первых, дает возможность более интенсивного охлаждения рабочего слоя статора и, во-вторых, предотвращает возможность захождения силовых магнитных линий потока в те места паза, где расположена обмотка статора (для уменьшения потерь на токи Фуко в меди статора).

Кроме того, такая форма пазов увеличенной глубины влечет за собой увеличение магнитного рассеяния в пазах, что способствует уменьшению мгновенной величины тока короткого замыкания.

В области построения турбинных генераторов советская промышленность за последние годы достигла больших успехов. Для иллюстрации на рис. 3 приводятся две кривые, где сопоставлены цифры расхода активного материала (меди и

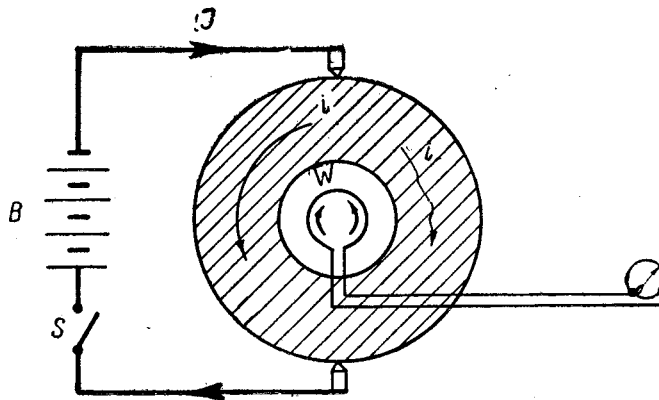


Рис. 2

железа) в kg на 1 kVA в турбогенераторах советского изготовления и зарубежных ⁷. Сравнение этих кривых показывает, что в области построения турбогенератора советская электропромышленность не только достигла тех же результатов, что и зарубежная электротехника, но в отношении технических показателей превысила достижения заграницы.

⁶ См. Е. и М., 1931, № 1.

⁷ См. статью С. Кругликова „Правда“, 1932, № 42.

Первый турбогенератор на 24 000 kVA нашими заводами „Электросила“ был построен всего только в 1930 г., но уже к концу 1931 г. был выпущен вдвое более мощный турбогенератор (50 000 kVA), работающий в настоящее время на Каширской электростанции.

Еще недавно нашими машиностроительными заводами были построены весьма мощные генераторы для двух гидростанций (Земо-Авчальской и Волховской), что является большим достижением наших заводов, до того времени еще не строивших таких крупных машин. В настоящее же время наши заводы по пути дальнейшего развития сделали еще шаг вперед, закончив первый гидрогенератор для Днепростроя громадной мощности в 62 000 kVA.

Постройка днепростроевских гидрогенераторов и мощных турбогенераторов выдвигает наши электромашиностроительные заводы на одну линию с крупнейшими американскими заводами, в результате чего в области крупного электромашиностроения мы обгоняем Европу и догоняем Америку.

II. Трансформаторы

Рост мощности центральных и районных станций, часто в большом числе связанных электрически друг с другом, при больших расстояниях, их разделяющих, влечет за собой требование постоянки трансформаторов на мощности все более и более высокие. Вопрос о выборе надлежащей системы охлаждения таких мощных силовых трансформаторов является весьма важным, так как от того

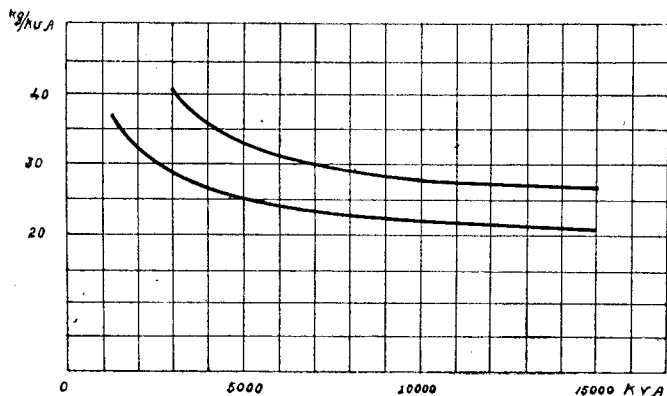


Рис. 3

или другого технического решения этого вопроса зависит в сильной степени эксплуатационная надежность силового трансформатора.

Затруднения водоснабжения иногда заставляют отказываться от охлаждения трансформаторного масла при помощи змеевиков с проточной водой.

В таких случаях обычно применяются специальные кожухи с циркуляционными трубками-радиаторами для охлаждения трансформаторного масла.

В последнее время было найдено весьма простое, можно сказать, технически незатейливое и в то же время весьма эффективное по результатам решение задачи, связанное с охлаждением трансформатора. Особенность этой системы охлаждения заключается в применении воздушных вентиляторов, при помощи которых обдуваются холодным воздухом радиаторные трубки, по которым циркулирует трансформаторное масло.

На рис. 4 показан трехфазный трансформатор американского завода Westinghouse на 37 500 kVA, где применен вышеуказанный принцип. На этой фотографии виден ряд воздушных вентиляторов, охлаждающих радиаторы путем их обдувки. В случае прекращения принудительной циркуляции масла и воздушной обдувки мощность этого трансформатора падает до 16 000 kVA.

На рис. 5 дана фотография другого трехфазного трансформатора, построенного фирмой SSW на 32 000 kVA, 115 000 V, $f=50$ пер/сек, где применен аналогичный принцип воздушного охлаждения. На фотографии видны расположенные рядом с трансформатором два охладителя масла, которые получают принудительную циркуляцию при помощи масляного насоса. Оба радиатора обдуваются охлаждающим воздухом при помощи ряда вентиляторов, расположенных внизу.

Мощность, затрачиваемая на вращение таких воздушных вентиляторов, в общем невелика; она в среднем равна около 0,2 kW на каждые 10 kW потерь в трансформаторе⁸.

Во избежание окисления и порчи трансформаторного масла в настоящее время часто незанятое маслом пространство в кожухе заполняется вместо воздуха каким-либо инертным газом, например азотом.

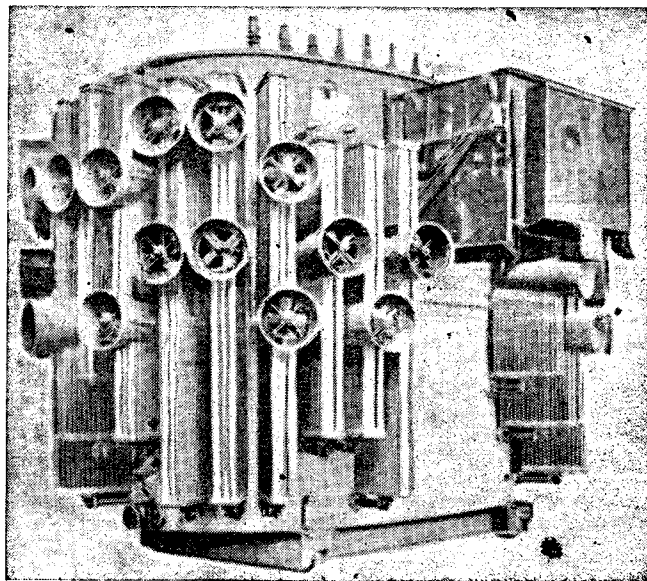


Рис. 4

У нас в СССР Электрозавод и ХЭМЗ в настоящее время строят трансформаторы мощностью до 20 000 kVA и напряжением в 115 kV; при этом в наших исследовательских лабораториях (заводских и ВЭИ) ведется подготовительная работа по производству высокомошных трансформаторов при условии перехода на наши изоляционные материалы вместо импортных⁹.

В заключение этого раздела следует упомянуть здесь о дальнейшем развитии и новых, предложенных в СССР, видоизмененных, так называемых, „нерезонирующих“ трансформаторов, впервые появившихся в Северной Америке.

В обмотках трансформаторов обычного типа, как известно, при нестационарных процессах в сети могут возникнуть опасные перенапряжения, обусловленные теми емкостями, которые имеются между самой обмоткой и корпусом трансформатора, а также между отдельными секциями самой обмотки.

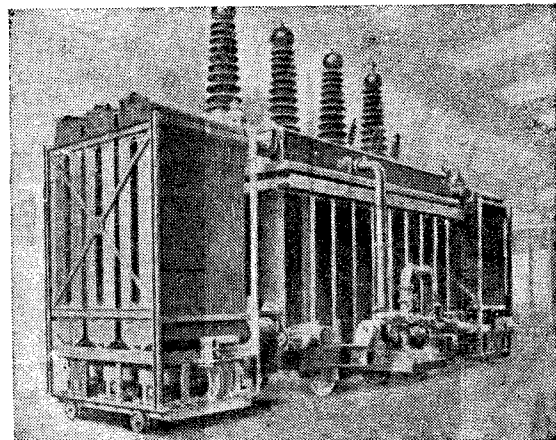


Рис. 5

Наличие этих емкостей в совокупности с самоиндукцией отдельных витков обмотки трансформатора может послужить

⁸ Siemens Zeitschrift, № 11, 1931.

⁹ Лапиров-Скобло, „Эл-во“, № 1, 1932.

причиной появления опасных перенапряжений резонансного характера.

Для уничтожения этих явлений Палуев (GEC) располагает внутри трансформатора вблизи обмоток особые металлические, покрытые изоляцией экраны, которым сообщается надлежащий потенциал, благодаря чему получается более или менее

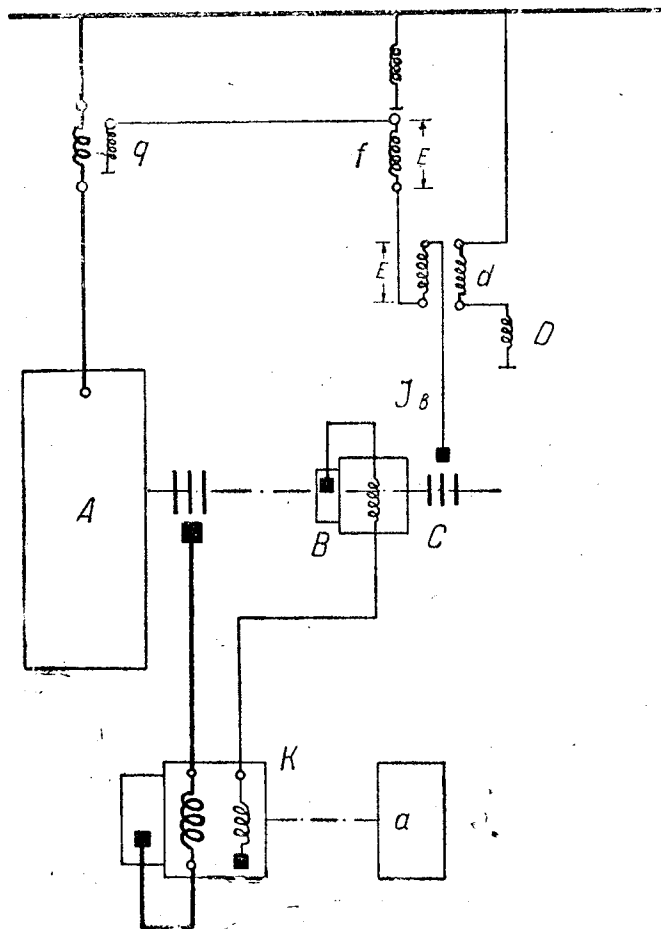


Рис. 6

равномерное распределение напряжения между отдельными секциями и витками обмотки трансформатора не только при нормальном режиме, но и при нестационарных процессах, вследствие чего устраняется возможность появления опасных перенапряжений.

Очень интересная модификация этой конструкции в свое время была предложена проф. А. А. Чернышевым, который путем шунтировки отдельных секций обмотки трансформатора при помощи конденсаторов добился приблизительно равномерного распределения напряжения между секциями обмотки при нестационарных процессах¹⁰.

III. Асинхронные машины

Асинхронный двигатель, обладающий весьма большой простотой конструкции и большой надежностью в работе, в настоящее время является одной из самых распространенных машин. Процент асинхронных двигателей с короткозамкнутым якорем от общего количества асинхронных машин за границей очень высок и колеблется в разных странах в пределах от 75 до 96% для мощностей, не превосходящих примерно 25 л. с. В СССР пока еще короткозамкнутые асинхронные двигатели не получили такого относительно большого распространения. В связи с выпуском нашими заводами („Электросила“, ХЭМЗ, завод им. Лепсе) целого ряда новых типов короткозамкнутых асинхронных двигателей (с глубоким пазом, типа Бушера и для врубловых машин) внедрение в промышленность короткозамкнутых моторов у нас в ближайшее время должно пойти более быстрым темпом.

В последнее время асинхронный двигатель начинает завоевывать также и те области применения, в которых до недавнего времени имели исключительное распространение синхронные двигатели,—это установки для улучшения $\cos \phi$ сети.

Ряд дискуссий, возникавших у нас и за границей о сравнительных достоинствах и недостатках синхронных и асинхронных двигателей с компенсацией сдвига фаз, приводит к заключению, что синхронный двигатель в отношении ряда качеств должен уступить, повидимому, в настоящее время первенство асинхронному двигателю¹¹.

Те преимущества, которые до сих пор приписывались синхронному двигателю, заключаются вкратце в следующем.

Синхронный двигатель увеличивает устойчивость системы, стремясь поддерживать напряжение сети на более или менее постоянной высоте. Действительно, предположим, что напряжение сети, к которому приключен синхронный двигатель, почему-либо вдруг упадет. Если ток возбуждения в двигателе остается прежним, то сила тока при этом возрастает, причем угол опережения тока по фазе тоже возрастает, так как степень перевозбуждения двигателя при понизившемся напряжении сети станет больше.

Синхронный двигатель в этом случае будет забирать из сети больший „емкостный“ ток, вследствие чего падение напряжения в сети частично скомпенсируется. Таким образом мы видим, что синхронный двигатель оказывает стабилизирующее действие на сеть в смысле постоянства напряжения.

К сожалению, асинхронный двигатель с компенсацией сдвига фаз вышеотмеченными достоинствами не обладает, так как при падении напряжения в сети уменьшается также и сила тока, полученная двигателем из сети. Поэтому, несмотря на ряд своих конструктивных и эксплуатационных достоинств, компенсированный асинхронный двигатель в качестве такого стабилизатора устойчивости сети и не мог быть до сих пор применен¹². В последнее время, однако, удалось найти такую схему питания ротора асинхронного двигателя, при которой в отношении стабилизирующих свойств он не только приблизился к синхронному двигателю, но и превзошел его.

Схема (однолинейная), при которой возможно вышесказанное, показана на рис. 6. Как видно из этого рисунка, вторичные обмотки трансформатора f и d включены друг другу навстречу, так что ток I_b притекающий к контактным кольцам преобразователя частоты (если пренебречь влиянием трансформатора g), устанавливается разностью напряжений:

$$I_b = \frac{E_2 - \bar{E}_1}{z} = \frac{\Delta E}{z}.$$

Благодаря наличию сильно насыщенного дросселя D напряжение E_2 при колебании напряжения сети почти не изменяется, так как при вышеупомянутых колебаниях сети напряжение $\bar{E}_1$ так же колеблется. Мы видим, что и разность напряжений $\Delta E = E_2 - \bar{E}_1$ при этом также колеблется, что должно повлечь за собой резкое изменение силы тока I_b , питающего кольца преобразователя частоты.

Таким образом видно, что при падении напряжения сети происходит резкое возрастание тока I_b и как следствие значительное возрастание напряжения на коллекторе компенсатора k , что влечет за собой, в свою очередь, возрастание „емкостного“ тока статора главной машины A .

Для иллюстрации тех результатов, которых можно достичь этой схемой, на рис. 7 приводятся сравнительные кривые изменения статорного тока асинхронного двигателя с компенсацией по вышеизложенному принципу (кривая I) и обычного синхронного компенсатора (кривая II).

Сравнивая эти кривые, мы видим, что ординаты кривой I при колебании напряжения в тех пределах, с которыми приходится иметь дело чаще всего на практике, значительно выше кривой II, т. е., другими словами, это означает, что компенсированный асинхронный двигатель по схеме рис. 6 будет лучше справляться с задачей поддержания постоянства напряжения сети, чем обычный синхронный двигатель.

В СССР вопрос о методах стабилизации работы длинных линий в ближайшее время приобретет особо важное значение; это будет ясно, если принять во внимание те громадные протяженности высоковольтных линий, на которые проектируется и строится у нас сейчас ряд новых передач. Поэтому вопрос о выборе типа стабилизирующих систем и машин в ближайшее время должен стать у нас предметом самого внимательного и широкого обсуждения.

¹⁰ Чернышов, Глазнов, Саянцкий. Защита обмоток трансформатора, „Эл-во“, № 1, 1931.

¹¹ ETZ, № 7, 1931 и Forschung u. Technik, 1930, стр. 251.

¹² ETZ, № 17, 1931.

Предварительное экспериментальное исследование вопросов устойчивости линий и машин в лабораториях ВЭИ (машинной и аппаратной) в настоящее время уже ведется.

IV. Рекуперация при тяге на постоянном токе

Для возможности рекуперативного торможения обычно тяговые двигатели последовательного возбуждения переключаются так, что их катушки возбуждения получают независи-

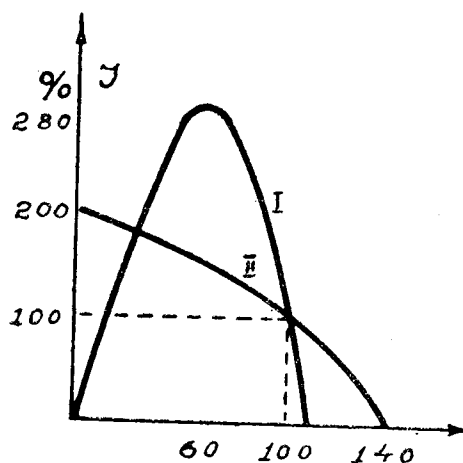


Рис. 7

мое питание от возбuditеля, каковым может быть или одна из тяговых машин, работающая в данном случае в качестве генератора, или специальный небольшой возбuditель. Эти рекуперативные схемы получаются сравнительно сложными и требуют соответственного усложнения контроллера и аппаратуры¹⁸. В последнее время, однако, было найдено значительно более простое решение задачи, настолько простое, что приходится удивляться, почему эта идея не получила своего осуществления раньше.

Новая схема требует отказа от традиционного серийного двигателя и перехода на тяговые двигатели смешанного возбуждения.

Вначале существовали опасения, что переход на тяговые двигатели-компаунд повысит толчки тока сети и создаст большие эксплуатационные затруднения в связи с возможными перегрузками тяговых двигателей. Однако опыты, поставленные парижским трамваем, показали несостоятельность таких опасений.

Эти опыты доказали возможность рекуперативного торможения при скоростях трамвая, опускающихся до 7 км/ч. В результате опытов оказалось возможным снизить средний удельный расход энергии с 50 Wh/t km до 38. Кроме того, при этом удалось также весьма значительно упростить аппаратуру (контроллер и сопротивления) и снизить ее вес. Общее снижение веса выразилось для одного вагона в 300 kg.

Вслед за парижским трамваем такие же опыты с компаундными моторами в качестве тяговых произвел манчестерский трамвай, причем получил среднюю экономию расхода энергии в 34,8%.

Операции при пуске в ход трамвая, оборудованного такими компаундными моторами, ничем не отличаются от пуска при обычных схемах (с серийными двигателями). В отношении же электрического торможения получается резкая разница в пользу компаундного мотора.

Рекуперативное торможение здесь отличается крайней простотой, недостижимой при старой схеме. Для перехода на рекуперацию здесь требуется закоротить серийную обмотку и усилить ток в шунтовых обмотках до такой степени, чтобы противоэлектродвижущая сила якоря превысила напряжение троллейного провода, после чего машина начинает работать как шунтовой генератор, возвращая электрическую энергию обратно в сеть.

У нас в СССР также производились опыты по возможности замены серийного двигателя компаундным в качестве тягового. Опыты вела на московском трамвае электротяговая лаборатория машинного отдела ВЭИ в конце прошлого года под руководством инж. Д. С. Димитрадзе.

¹⁸ См. К. Ше н ф е р, Рекуперация электрической энергии при тяге на постоянном токе, Эл-во, 1931.

Результаты опытов оказались весьма благоприятными; вместо обычного торможения пневматическим тормозом при этих опытах применялось исключительно электрическое торможение с возвращением энергии в сеть.

Применяя в качестве тягового компаундный мотор, мы можем уменьшить только потери, связанные с торможением; устранить потери в реостатах при пуске в ход этот метод не дает возможности; кроме того, этот метод не дает возможности производить рекуперативное торможение до полной остановки.

Устранения потерь при пуске можно добиться путем применения схемы питания тяговых двигателей с вольтодобавочным агрегатом, установленным на моторном вагоне. Такая схема была разработана инж. А. С. Димитрадзе и испытана научными сотрудниками тяговой лаборатории ВЭИ инж. Губановым, инж. Томашевичем и др.

Особенность этой схемы заключается в том, что в цепь якорей тяговых двигателей A_1 и A_2 включается якорь вольтодобавочной машины ВДМ, которая здесь заменяет пусковой реостат, поглощая почти все напряжение линии при пуске. При нормальном ходе тяговых двигателей это напряжение на коллекторе вольтодобавочной машины ВДМ получается небольшим, так что все линейное напряжение ложится на якоря тяговых моторов A_1 и A_2 .

Как видно из рис. 8, вольтодобавочная машина ВДМ, приводимая во вращение вспомогательным мотором М, все время вращается с постоянной скоростью независимо от скорости тяговых двигателей A_1 и A_2 . На валу агрегата М-ВДМ (установленного на моторном вагоне) еще сидит возбuditель В, питающий обмотки возбуждения тяговых двигателей.

Возбuditель В имеет две обмотки возбуждения, из которых обмотка d приключена к щиткам одного из якорей A_1 , а другая обмотка c приключена к сети.

Вольтодобавочная машина ВДМ тоже имеет две обмотки возбуждения, из которых одна обмотка a приключена шунтом к якорю ВДМ, а другая b —к сети.

Процесс пуска в ход здесь происходит следующим образом. Пускается в ход агрегат М-ВДМ-В; замыкается рубильник 1, после чего ВДМ самовозбуждается и на клеммах ее якоря появляется напряжение; затем включается на сеть обмотка b таким образом, чтобы действие этой обмотки совпадало с действием обмотки a ; включая рубильник 3, даем возбуждение моторам. Для трогания с места нужно замкнуть рубильник 2. Дальнейшая работа тяговых двигателей происходит автоматически до момента начала торможения или выбега.

По мере раскручивания моторов A_1 и A_2 напряжение на концах шунтовой обмотки a , равное разности напряжений сети и э. д. с. моторов A_1 и A_2 , делается все меньше и меньше, вследствие чего ток в шунте a постоянно уменьшается, вследствие этого напряжение на щетках якоря ВДМ постепенно уменьшается, и все напряжение линии переходит на тяговые моторы.

На рис. 9 показаны результаты опытных поездок на одном из моторных вагонов московского трамвая, оборудованного по схеме так называемого „трехступенчатого управления“, разработанного в ВЭИ (несколько отличающегося по схеме от рис. 8).

Опыты показали возможность рекуперативного торможения до остановки и безреостатного пуска мотора. Количество возвращенной электрической энергии в сеть колебалось в пределах 30—40%.

V. Коллекторные двигатели переменного тока

До сих пор не утихает борьба мнений между сторонниками применения постоянного или однофазного тока. Решение этой проблемы при наличии перспектив мощного развития электрификации железных дорог для СССР представляет огромное значение. Идея целесообразности применения во многих случаях однофазного тока в настоящее время завоевывает все больше и больше сторонников.

В качестве примера здесь можно привести данные электровозов, недавно построенных американским заводом GEC для железной дороги близ Нью-Йорка (New-York—New-Haven) и оборудованных однофазными коллекторными двигателями, не зная на сравнительно высокую частоту ($f = 25$ пер/сек против частоты $f = 16\frac{2}{3}$, принятой в качестве стандарта в Европе).

Часовая мощность этих электровозов 3 000 л. с. при скорости в 80 км/ч. Напряжение в троллейном проводе 11 000 В, напряжение на клеммах мотора—420 В. Мощность обычного двигателя 250 л. с. Каждый электровоз оборудован 12 такими двигателями. Каждый двигатель имеет 12 полюсов, что дает мощность на пару полюсов 42 л. с. или 31 kW.

Принимая во внимание, что при переходе на частоту $f = 16 \frac{2}{3}$, стандартную для тяги в Европе, поток возбуждения каждого полюса двигателя может быть увеличен в отношении частот $25:16 \frac{2}{3}$. Путем пересчета величины удельной мощности для частоты $f = 16 \frac{2}{3}$ получаем:

$$\frac{31 \cdot 25}{16 \frac{2}{3}} = 46 \text{ kW.}$$

Найденная таким образом величина значительно ниже той, которая была принята при расчете двигателей WASSEG и которая для моторов мощностью 220 kW была принята равной 73 kW¹⁴.

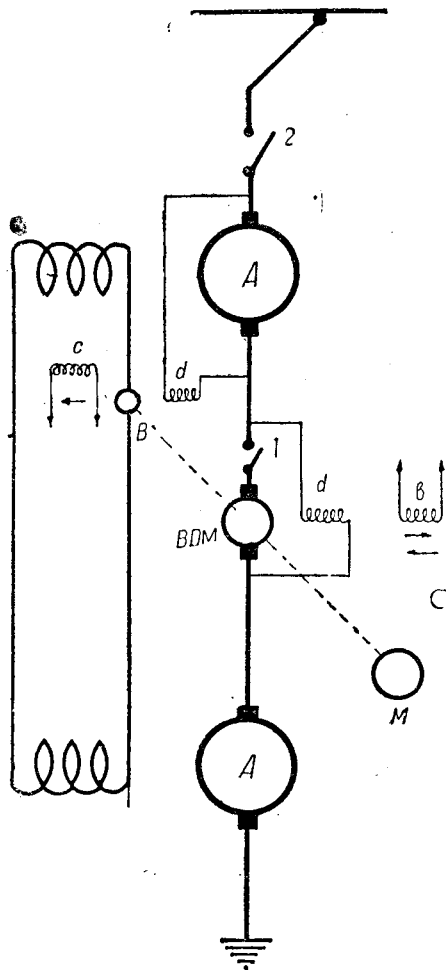


Рис. 8

Таким образом мы видим, что американские заводы с целью получения хорошей коммутации пошли значительно дальше европейских заводов в смысле уменьшения потоков возбуждения и связанного с этим уменьшения „трансформаторной“ э. д. с., индуцированной потоком возбуждения.

Желание получить, несмотря на уменьшение магнитного потока возбуждения, все же достаточно высокое напряжение на коллекторе (420 V) заставило американских конструкторов пойти на увеличение диаметра коллектора и повысить окружную скорость на коллекторе, которая в последних типах доходит до 45 m/sec.

При таких высоких окружных скоростях пришлось отказаться от подшипников скользящего трения и заменить последние роликовыми подшипниками.

Допустив при расчете машины весьма малую величину потока возбуждения, пришлось в ядре допустить относительно большую величину линейной нагрузки AS во избежание чрезмерного ухудшения использования типа машины и уменьшения ее машины постоянной.

Те тенденции, которых придерживаются в настоящее время американские (и европейские) заводы при проектировании однофазных коллекторных двигателей для тяги, могут быть кратко сформулированы следующим образом:

- 1) малый магнитный поток возбуждения,
- 2) большая окружная скорость якоря и коллектора,
- 3) большая линейная нагрузка якоря,
- 4) применение эквипотенциальных соединений в ядре,
- 5) применение дополнительных полюсов серийного возбуждения с шунтировкой омическим сопротивлением обмоток дополнительных полюсов.

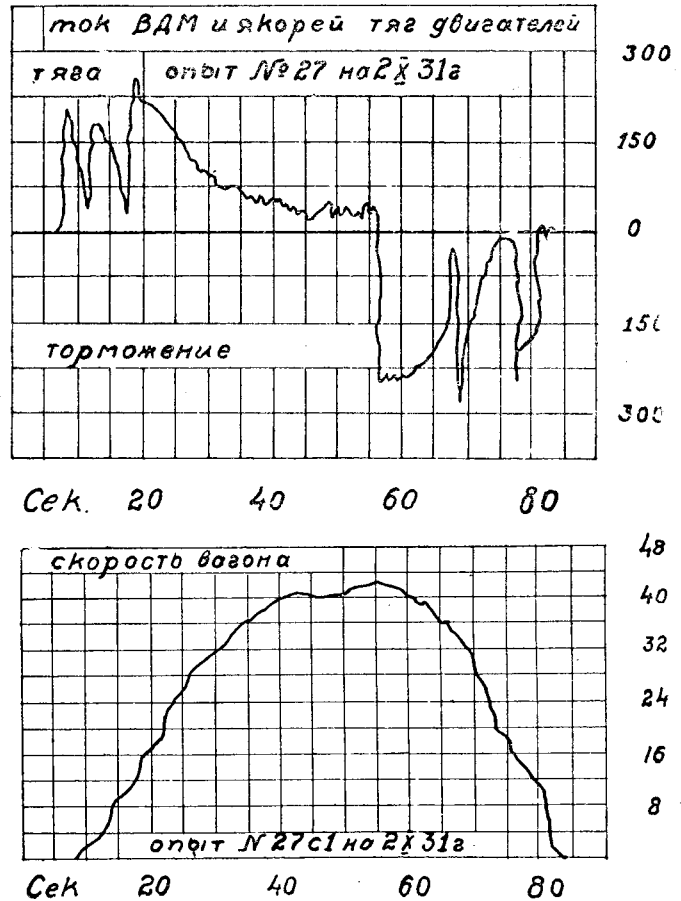


Рис. 9

- 6) применение роликовых подшипников,
 - 7) применение сварных конструкций в статоре,
 - 8) форсированная, надежная вентиляция¹⁵.
- Успехи в области построения тяговых однофазных коллекторных двигателей последних лет за границей, а также целый ряд электрификаций железных дорог на однофазном токе нормальной частоты с применением так называемых „умформер-

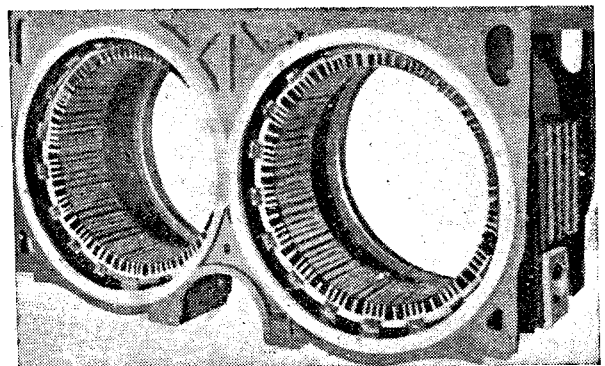


Рис. 10

ных“, или „мотор-генераторных“, типов электровозов, должны обратить на себя внимание и наших проектирующих организаций при решении вопроса о выборе рода тока для целей электрической тяги на железных дорогах дальнего следования.

¹⁴ См. ETZ, 1923. Fachbericht.

¹⁵ См. Journal of the AIEE. № 12, 1930. и G. E. Review, № 3, 1931.

VI. Бесколлекторные двигатели переменного тока последовательного возбуждения

Недавно была сделана весьма интересная попытка обойти затруднения коммутации, связанные с наличием коллектора в машинах постоянного и в особенности в машинах однофазного тока, путем упразднения самого коллектора.

Это было достигнуто методом перенесения функций коллектора на ртутный выпрямитель.

В октябрьском „Бюллетене швейцарских электротехников“ за 1931 г. описаны весьма интересные опыты¹⁶, которые производились заводом Броун-Бовери с таким бесколлекторным двигателем последовательного возбуждения, получающим питание от сети однофазного тока. Такую схему предположено применить в виде опыта на электровозах однофазного тока. Идея этой новой схемы заключается в следующем.

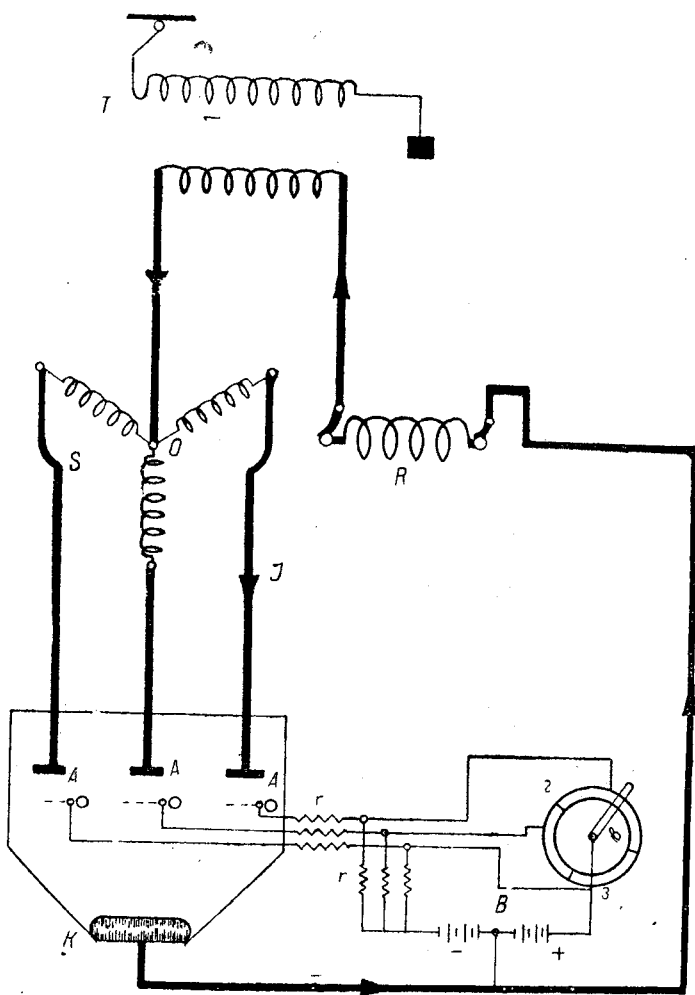


Рис. 11

Предположим, что электровоз, оборудованный тяговыми двигателями постоянного тока, мы пожелаем приспособить для питания от троллейного провода однофазного тока. Какие изменения придется при этом ввести в схему?

Ответ получается определенный: необходимо установить на электровозе преобразователь переменного тока в постоянный, в виде умформера или ртутного выпрямителя.

В случае последнего варианта мы можем достигнуть большего упрощения системы, выбросив совсем коллектор тягового двигателя и заменив его ртутным выпрямителем. Таким образом ставится задача о замене коллектора ртутным выпрямителем.

На рис. 11 показана принципиальная схема соединения бесколлекторного двигателя постоянного тока последовательного возбуждения. Такой двигатель состоит из ротора R с обмоткой, концы которой выведены к двум контактным кольцам и статора S , похожего на статор асинхронного двигателя.

Для того чтобы понять принцип устройства, показанного на рис. 11, обратимся сначала к рис. 12, на котором схематически показан так называемый „обращенный“ двигатель постоянного тока.

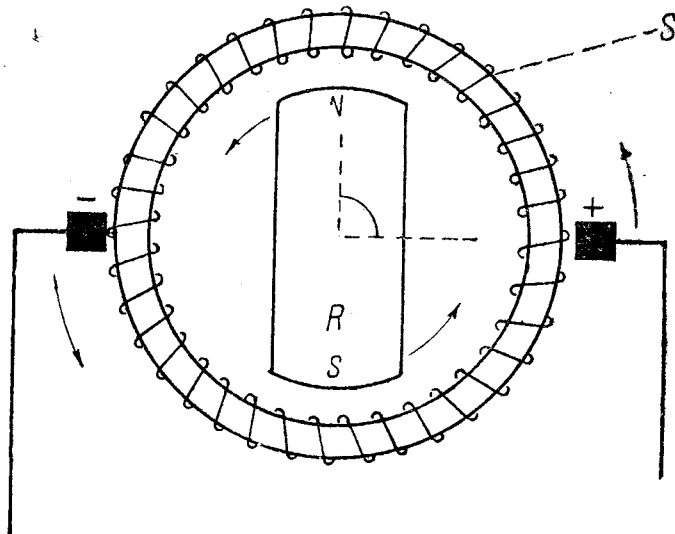


Рис. 12

В этом двигателе сделан неподвижным якорь S с коллектором, электромагниты же возбуждения NS и щетки на коллекторе вращаются.

Можно, однако, избавиться от необходимости иметь коллектор и щетки, если производить питание обмотки неподвижного якоря таким образом, чтобы постоянным током поочередно одна за другой обтекались отдельные секции статорной обмотки $I-0$, $II-0$, $III-0$, как показано на рис. 13.

Для того чтобы иметь возможность поочередно питать током секции статорной обмотки $I-0$, $II-0$ и $III-0$, как показано на рис. 11, можно применить ртутный выпрямитель с промежуточными и „управляющими“ сетками, дающими возможность поочередно пускать или прекращать ток между катодом K и анодами A_1 , A_2 и A_3 .

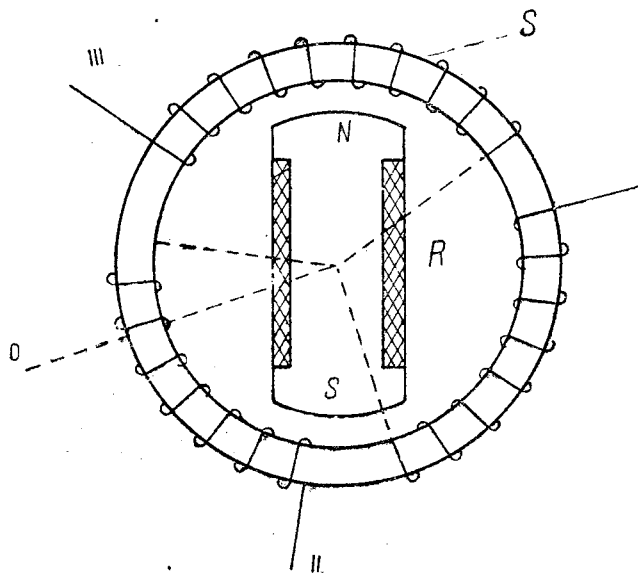


Рис. 13

Если, как показано на рис. 11, правая сетка будет иметь положительный потенциал, а две остальные—отрицательный, то ток потечет только в цепи катода K и анода A_1 , в цепи же анодов A_2 и A_3 тока не будет. Таким образом при этих условиях током будет обтекаться только секция обмотки статора двигателя $I-0$, остальные же секции, $II-0$ и $III-0$, будут без тока.

Если сообщить положительный потенциал какой-нибудь другой сетке, например, сетке анода A_2 , то потечет ток в цепи секции обмотки статора $II-0$ и т. д.

¹⁶ См. также ВВС-Mitt., № 1, 1932.

При всех вышеописанных явлениях мы будем иметь поочередное последовательное соединение обмотки ротора R с секциями статора, так что эта машина, состоящая из статора S и ротора R , будет по существу представлять собой двигатель последовательного возбуждения.

Для того чтобы иметь возможность сообщать сеткам выпрямителя поочередно положительные и отрицательные заряды, служит неподвижный коммутатор с пластинами 1, 2, 3 и со щеткой ϵ , трассера которой, будучи механически связана валом

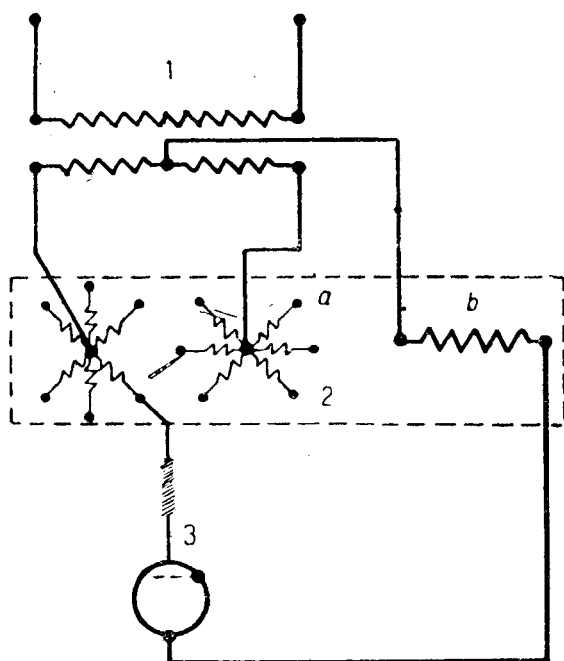


Рис. 14

мотора, приводится во вращение; таким образом при помощи показанной на рис. 11 небольшой аккумуляторной батареи B сеткам выпрямителя в определенной последовательности можно сообщать то положительные, то отрицательные потенциалы. При указанном на рис. 11 положении щетки ϵ , касающейся в рассматриваемый момент пластины 1, положительный потенциал получает правая сетка выпрямителя, и поэтому ток устремляется к аноду A_1 и в обмотку $I-O$. На рис. 11 для простоты показана схема питания бесколлекторного двигателя, статор которого состоит только из 3 секций. В опытном двигателе, описанном в выше цитированной статье швейцарского „Бюллетеня“, статор имел не 3 секции, а 12, и выпрямитель имел 12 анодов с принадлежащими последним сетками, что дало возможность увеличения равномерности вращения в пространстве потока двигателя и устранить недостаток схемы рис. 11, заключающийся в том, что по обмотке ротора в вышеописанной схеме в сущности протекает не постоянный, но сильно пульсирующий ток.

На рис. 14 показана эта новая схема (с двенадцатисекционной обмоткой статора) бесколлекторного двигателя.

Как видно из чертежа, здесь статор двигателя состоит из двух шестифазных обмоток, смещенных друг относительно друга на 30° , так что образуется симметричная 12-фазная система. Нулевые точки обеих статорных обмоток соединены

с зажимами вторичной обмотки трансформатора. Один конец обмотки возбуждения b (ротора) соединен с серединой низковольтной обмотки трансформатора, другой же конец — с катодом ртутного выпрямителя.

Принцип действия этой системы такой же, как и описанной выше упрощенной схемы.

Достоинством, однако, новой схемы по сравнению с предыдущей, является, во-первых, то, что ток, текущий в обмотке ротора b , имеет характер, напоминающий больше постоянный ток, и, во-вторых, что амплитуда вращающегося поля, создаваемого статорными обмотками, имеет более постоянный характер, чем в схеме рис. 11.

Хотя предварительные опыты, судя по журнальным описаниям, и были удачными, все же о полной практической пригодности этой схемы можно будет говорить лишь после длительных испытаний в условиях эксплуатации для выяснения степени надежности в работе ртутного выпрямителя, подверженного постоянной тряске на электровозе.

VII. Электрическая сварка

Электрическая сварка приобретает в настоящее время весьма широкое применение в СССР.

Как известно, для целей сварки применяются несколько систем сварочных генераторов с падающей внешней характеристикой.

В ВЭИ произведено исследование ряда таких машин с точки зрения происходящих в них нестационарных процессов во время сварки. Из всех испытанных машин лучшие результаты дала машина с „поперечным полем“. Хорошие результаты получаются также от машины с „вырезанными“ полюсами и вспомогательной щеткой.

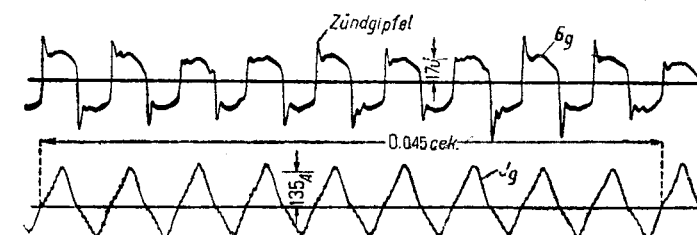


Рис. 15

Чрезвычайно важным вопросом является вопрос о том, какая система тока является более предпочтительной для сварки. Практика показывает, что на переменном токе сварка получается в ряде случаев менее удовлетворительной благодаря своеобразным физическим явлениям, происходящим при этом в дуге в связи с несколько пониженной температурой электродов.

В ВЭИ в электросварочной лаборатории машинного отдела были поставлены опыты с применением для сварки тока повышенной частоты (400–600 пер/сек). При этом можно было ожидать, что условия образования дуги более удовлетворительны вследствие лучших температурных условий горения дуги¹⁷. Опыты подтвердили эти предположения — дуга получилась очень устойчивой. На рис. 15 показана осциллограмма сварки током повышенной частоты, на которой, между прочим, хорошо виден некоторый выпрямительный эффект дуги, обусловленный разностью температур электрода и свариваемой детали.

¹⁷ Инж. Е. В. Нитусов и инж. Кислюк.

„Необходимо поставить в качестве важнейшей задачи 1932 г. внедрение новейших технологических методов по всем отраслям машиностроения для наиболее полного использования оборудования, снижения расхода материалов на единицу изделия и повышения качества продукции“.

(Из резолюции XVII конференции ВКП(б) по докладу т. ОРДЖОНИКИДЗЕ об итогах развития промышленности за 1931 г. и задачах 1932 г.).

Современные тенденции в развитии высоковольтных синхронных генераторов и способов их защиты

В. П. Апаров и В. М. Лавров
ВЭИ

Вопросы крупного генераторостроения приобретают в СССР все более важное значение. Проблемы единой высоковольтной сети и кольцевания крупнейших электростанций выдвигают перед электротехнической промышленностью задачу критического освоения достижений передовой капиталистической техники в области построения и эксплуатации сверхмощных турбо- и гидрогенераторов. Осуществление генераторов мощностью 100 000 kVA и выше в одной единице потребовало повышения напряжения на зажимах машины в сравнении с напряжением, ранее применявшимся, так как в противном случае рабочие токи, с которыми пришлось бы иметь дело в таких случаях, превосходили бы значения, допускаемые для существующих в настоящее время выключателей, разрядников и т. п. Однако переход на более высокое напряжение выдвинул и целый ряд трудностей, которые должны были быть преодолены.

Лучшим решением было бы выполнение синхронной машины с напряжением данной линии передачи. В этом случае выбрасывается ряд промежуточных звеньев, из которых главным является повысительный трансформатор. Получающаяся при этом экономия будет приведена ниже на примере одной построенной установки.

Однако вопрос о выполнении генератора с напряжением современной воздушной линии передачи 110—220 kV ввиду его большой сложности является пока предметом лабораторных изысканий. Поэтому указанная задача является в основном разрешенной только для питания кабельных линий с напряжением до 33 000 V. Кабельные сети применяются обычно при электрических станциях больших городов; они свободны от опасных атмосферных перенапряжений, что является крайне важным фактором, благоприятно отзывающимся на работе генератора без трансформатора.

Если пойти далее, то требование иметь генератор более высокого напряжения может вывиться и при работе генераторов с трансформаторами. Основными факторами, решающими вопрос в этом направлении, будут являться выключатели и подводящие кабели.

В мощных турбогенераторах возникают затруднения при устройстве отводящих кабелей. Так, например, в случае генератора мощностью 94 000 kVA, 11 000 V ток одной фазы будет равен 4 900 А.

Чтобы отвести этот ток, потребуется 6 дюймовых кабелей, а всего, следовательно, 36 кабелей.

Такое большое количество кабелей приходится проводить по туннелю, обычно устраиваемому под машиной в продольном направлении. При напряжении в 33 000 V ток фазы уменьшается до 1 460 А, при этом потребуется 6 или 7 кабелей, что позволит сделать кабельный туннель значительно меньших размеров, и тем самым основание машины не будет чрезмерно ослаблено.

Трудности изготовления надежных масляных выключателей на большую силу тока мощных генераторов (порядка 100 000 kVA), также заставляют думать о повышении напряжения генераторов. Правда, в этом случае до настоящего времени задача решалась не повышением напряжения генератора, а делением его мощности на две обмотки; появились так называемые двухобмоточные турбогенераторы. В этой конструкции сила тока каждой обмотки, а следовательно, мощность соответствующих масляных выключателей уменьшилась; обясняется это тем, что двухобмоточные генераторы при параллельной работе и при коротких замыканиях обладают рядом ценных свойств, сравнительно недороги в производстве и надежны в эксплуатации. В то же самое время высоковольтный генератор по сравнению с двухобмоточным был бы и дороже и при современном состоянии вопроса изоляции машин и их конструкции и менее надежен. Произведенные американцами подсчеты показали, что генератор мощностью 100 000 kVA нормальной конструкции, изготовленный на 22 000 V, обошелся бы примерно на 20—25% дороже по сравнению с таким же генератором на 11 000 ÷ 14 000 V и к. п. д. его получился бы на 0,5% ниже.

В первом случае для генератора понадобилась бы более дорогая и солидная изоляция, выполнение обмотки потребовалось бы более тщательное, и она обошлась бы дороже. Проблема высоковольтного генератора переменного тока упирается в конструкцию обмотки и в качество изоляции.

В генераторах, выполненных в настоящее время с напряжением до 36 000 V, не меняя основной формы и конструкции машины, шли именно этими двумя путями. Построение генераторов более высокого напряжения, возможно, встретится с более серьезными изменениями конструкции. Интересной попыткой высоковольтного генератора является машина без пазов с цилиндрической, как у трансформатора, обмоткой фаз, варианты которой были предложены еще Mordey и Kingdon и Charles Brown.

В последнее время теория генератора высокого напряжения, построенного по вышеуказанному принципу, подробно разработана инж. В. Kudrna¹ (описание таких машин см. ниже).

Такие машины имеют ряд преимуществ при выполнении их с высоковольтными обмотками и должны быть нами оценены как один из этапов достижения синхронной машиной напряжения, равного напряжению линии передачи.

Как упоминалось выше, трансформаторы, повышающие напряжение генераторов до напряжения линии электропередачи, кроме своего непосредственного назначения, служат также защитой генератора от различных перенапряжений, возникающих на линии.

Таким образом проблема повышения напряжения электрических генераторов до напряжения линии электропередачи упирается в основном в два вопроса: в изменение конструкции генератора, чтобы повысить его рабочее напряжение, и в защиту генератора от перенапряжений на линии.

Соответственно намеченным вопросам мы рассмотрим сначала генераторы высокого напряжения, близкие к нормальной конструкции, затем работы по конструированию новых типов высоковольтных синхронных машин и, наконец, вкратце вопрос о защите высоковольтных машин при их непосредственном включении на сеть.

Впервые 2 гидрогенератора напряжением 30 kV для непосредственного включения в линию передачи были установлены в 1905 г. в Италии.

Генераторы были мощностью по 5 200 kVA, 30 kV, 450 об/мин и производимый ими трехфазный ток при 45 пер/сек передавался на расстоянии 55 km в Рим. При конструировании этих машин уже была применена миканитовая изоляция.

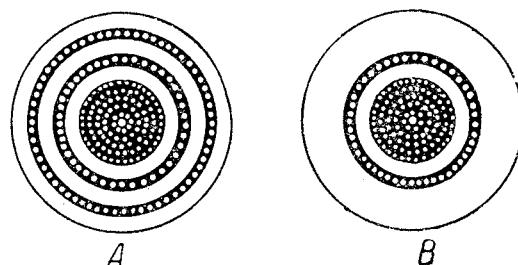


Рис. 1. Сечение стержневого провода кабельной обмотки. Стрелки указывают слои „центральный“, „внутренний“ и „наружный“

Интересным является опыт построения генератора на 33 kV, 25 000 kW и 3 000 об/мин со специальной кабельной обмоткой, сконструированного Ч. Парсонсом в 1921 г. и установленного на Бримсдаунской силовой станции в Северном Лондоне в конце 1928 г.²

Особенность конструкции обмотки, предлагаемой Парсонсом, заключается в применении трехслойного концентрического кабеля, причем специальная схема обмотки позволяет значительно увеличить фазовое напряжение машины, не увеличивая сравнительно с обычным градиентов электрического поля на изоляции, благодаря чему в качестве изоляционного материала в данной конструкции был применен миканит.

Как видно из рис. 1, стержневой провод представляет концентрический кабель, имеющий три слоя—„центральный“, „промежуточный“ и „наружный“, в отличие от обычного кабеля они изолированы друг от друга и снаружи миканитом.

¹ Arch. f. E., XXIII, 1930. Kudrna, Nutenlos oder hochspannungs Synchronmaschine.

² Ch. A. Parsons and I. Rosen, Direct Generation of Alternating Current at High Voltages. The Journ. of the Inst. of El. Eng., vol. 67, № 392, сентябрь 1929, стр. 1085.

Каждый такой кабель закладывается в отдельный круглый паз; следовательно, на паз приходится три проводника. Концы кабелей выступают за железо статора на определенное расстояние для соединения с лобовыми соединениями. Такая конструкция кабелей имеет весьма высокие механические качества, тем более, что в процессе обмотки и в производстве кабели ни разу не подвергаются сгибанию.

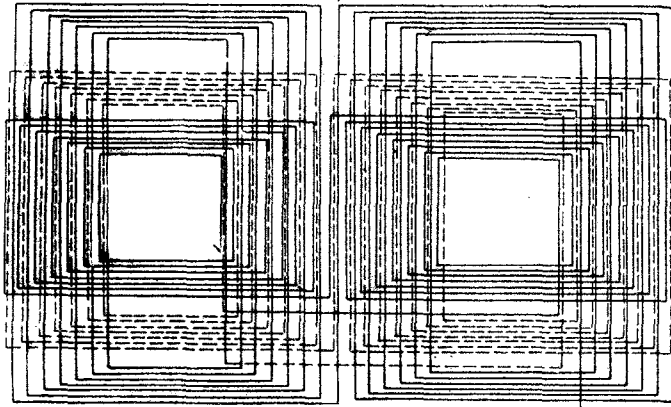
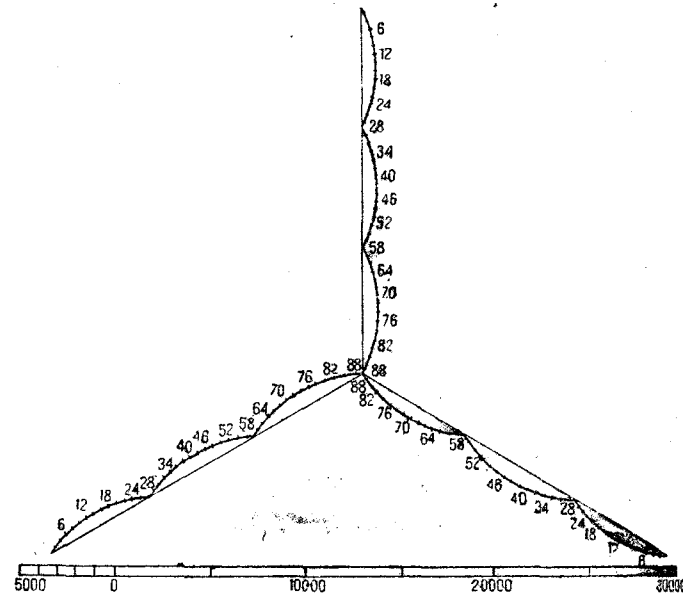


Рис. 2. Схема обмотки одной фазы статора высоковольтного турбогенератора Парсонса

Соединяются между собой проводники следующим образом: „центральные“ проводники каждой фазы соединяются между собой последовательно и затем подсоединяются к „про-

межуточному“; „промежуточные“ соединяются между собой таким же образом и присоединяются далее к „наружному“. Первый центральный проводник образует начало фазы, по-



Разрез через лобовые соединения
Разрез через железо статора
Рис. 3. Векторная диаграмма напряжений проводников фаз обмотки статора. Цифры указывают номер проводника обмотки. Внизу дан масштаб напряжений

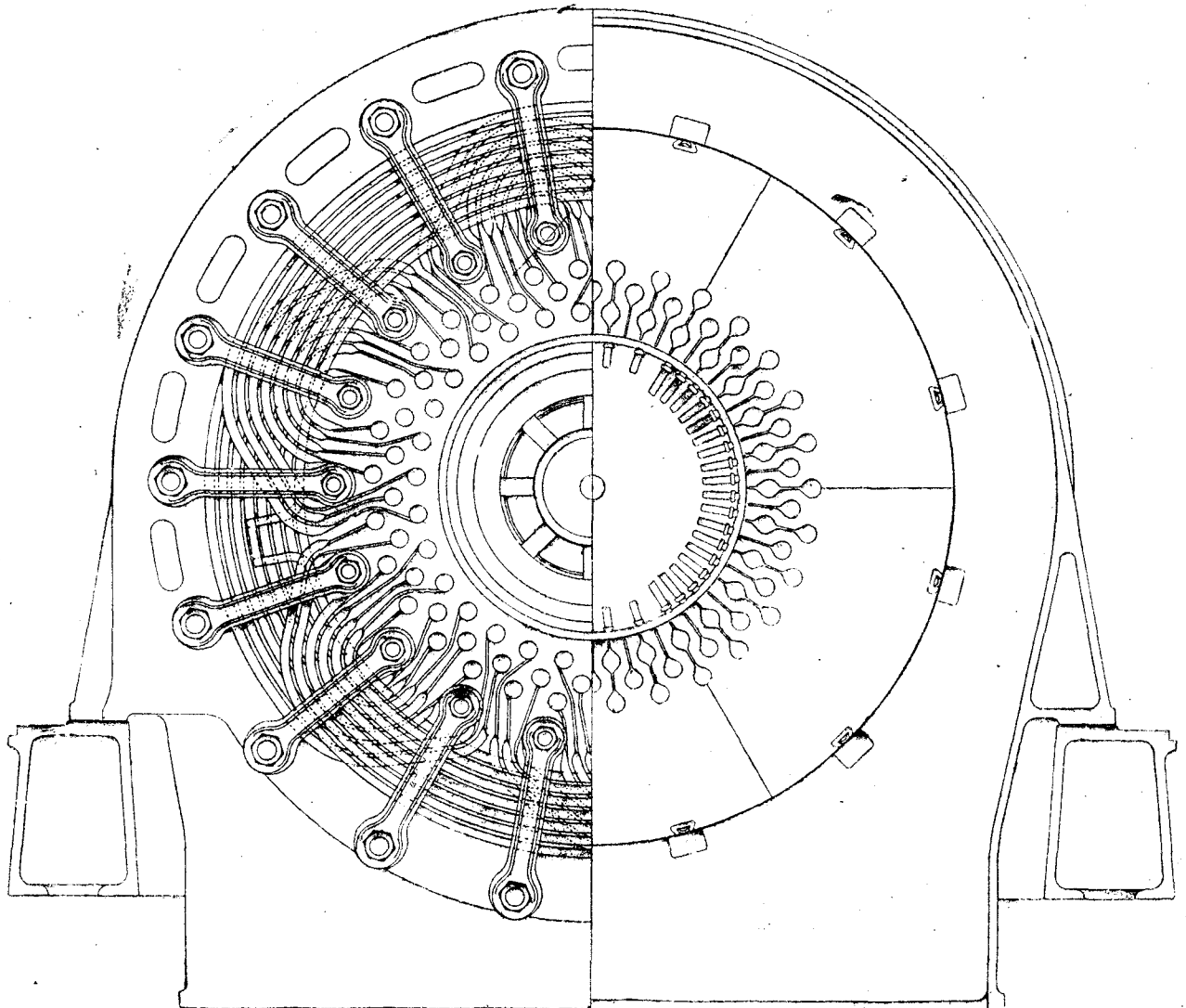


Рис. 4. Разрезы трехфазного двухполюсного высоковольтного генератора на 33 000 В, 3 000 об/мин, 31 250 кВА

следний наружный—соединяются с последними наружными двух других фаз в звезду и присоединяются к нейтрали. Схема обмоток, данная на рис. 2, поясняет сказанное.

никами любого паза и между наружными проводниками и нейтралью будет не более 6 500 В, что является достаточно умеренной величиной.

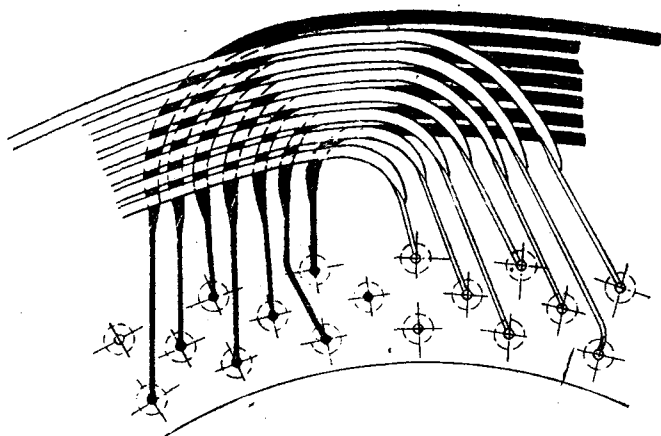


Рис. 5. Расположение лобовых соединений смежных фаз

На рис. 3 дана векторная диаграмма напряжений. Пользуясь показанным на чертеже масштабом, можно найти, что потенциал центральных проводников относительно нейтрали будет колебаться от 19 080 В (что равняется фазовому напряжению $\frac{33\,000}{\sqrt{3}}$) до 13 000 В; потенциал промежуточных проводников от 13 000 В до 6 500 В и наружных от 6 500 В до нуля. Следовательно, разность потенциалов между провод-

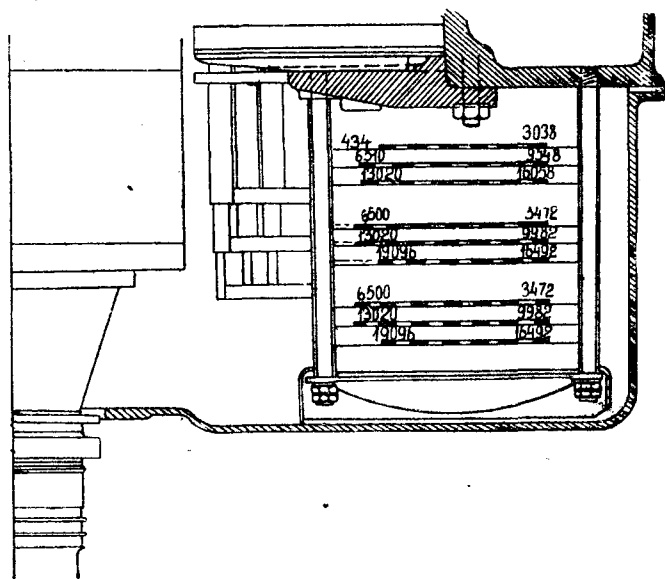


Рис. 6. Продольный разрез лобовых соединений. Цифры показывают напряжение конечных витков

Описываемая обмотка, как видно из схем, относится к трехфазному двухполюсному генератору с 90 пазами и тремя проводниками на паз. На каждую фазу приходится по 88 проводников, распределенных в 30 пазах; э. д. с. каждого провода будет равна 217 В.

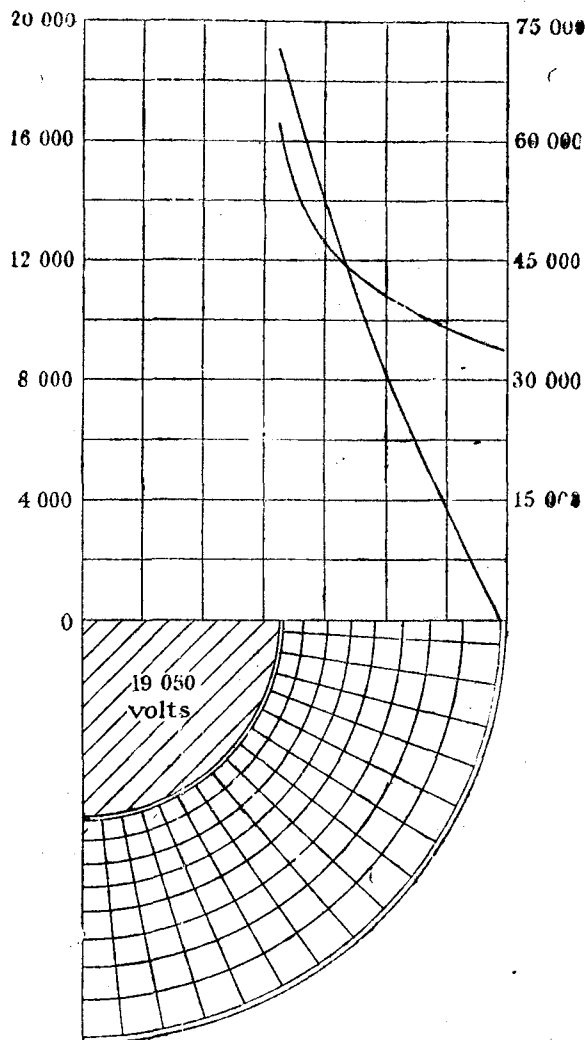
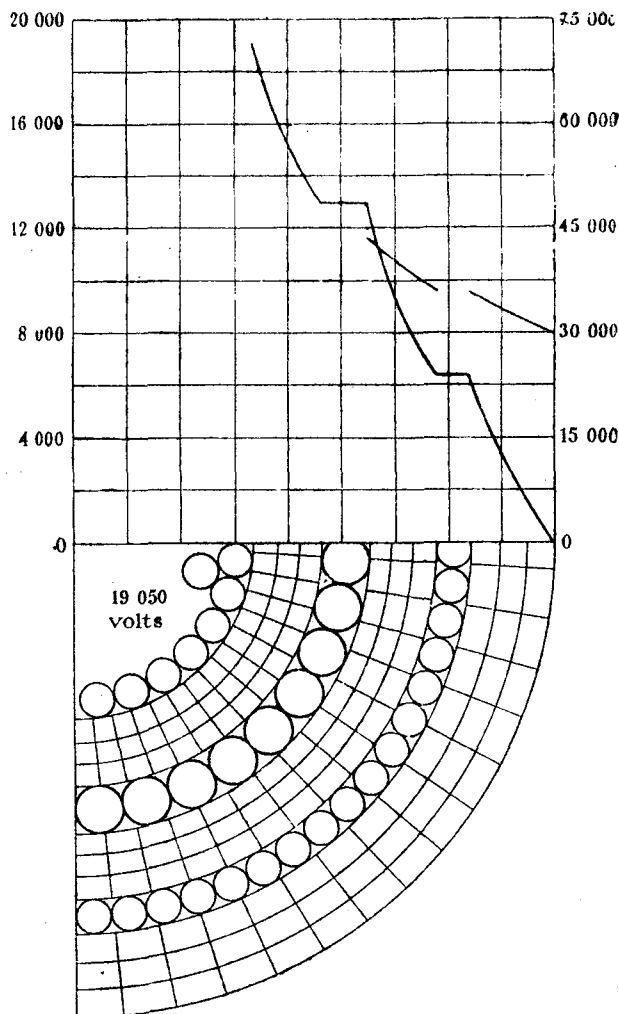


Рис. 7. Кривые изменения градиента (в вольтах на дюйм) и падения потенциала в изоляции обыкновенного и трехслойного кабелей

Как видно из рис. 4, представляющего схематический разрез этого генератора, и из схемы обмотки (рис. 2) два пазы на фазу имеют только по два проводника, деталь этого кабеля показана на рис. 1. Также из схемы обмотки видно, что кабели с самым высоким потенциалом не проводятся вблизи пазов, содержащих кабели другой фазы, что увеличивает расстояние между районами максимального потенциала, снижая тем самым градиенты.

Пазы обмотки расположены в три ряда в шахматном порядке (рис. 4). Такое расположение позволяет сохранить постоянную плотность силового потока по высоте зубца статора, причем, хотя поперечное сечение пазов этой конструкции представляет окружность, занимающую по сравнению с пазами обычного продолговатого сечения меньшее радиальное протяжение, реактанс рассеяния получается даже увеличенным.

Этот увеличенный реактанс имеет большое значение ввиду необходимости защиты от внезапных коротких замыканий и может быть объяснен тем, что в данной конструкции благодаря закрытым пазам для потока рассеяния создается лучший путь сравнительно с обычно применяемыми открытыми пазами.

По той же причине внутренняя поверхность статора получается гладкой, и таким образом, налицо некоторое уменьшение воздушного зазора, а следовательно, и энергии возбуждения, что также благоприятно влияет на уменьшение мощности различных нестационарных процессов.

Лобовые соединения, показанные на рис. 5 и 6, состоят из плоских медных полос, загнутых на ребро, что обуславливает большую их механическую жесткость. Дополнительно они поддерживаются прокладками из пропитанного дерева, укрепленными на специальной конструкции.

У каждой фазы имеются три группы лобовых соединений, соответствующих центральным, промежуточным и наружным проводникам. Перекрещивающиеся соединения между отдельными группами сделаны съёмными для возможности испытания на пробой каждой трети фазы отдельно. Кроме того, эти съёмные соединения дают возможность включать защиту между витками, если к тому будет надобность.

Максимальная разность потенциалов между отдельными смежными группами лобовых соединений разных фаз будет равна не полному фазовому напряжению, как в обычных конструкциях, а меньшему, так как смежными группами разных фаз могут быть группы лобовых соединений центральных проводников одной фазы и наружной другой, и следовательно, разность потенциалов их не может быть больше разности потенциалов проводника № 1 одной фазы и проводника № 58 другой, т. е. (рис. 3) не более 23 000 В. В остальном этот генератор имеет нормальную конструкцию.

Рис. 7 дает сравнение падения потенциала и изменение градиентов поля в изоляции простого и трехслойного кабеля при одинаковой площади сечения меди в них. Как видно, градиенты в изоляции трехслойного кабеля гораздо ниже, чем в обычном. Благодаря меньшей толщине отдельных слоев изоляции трехслойного кабеля различные дефекты изоляции вроде трещинок или воздушных прослоек должны встречаться в ней также реже, чем в обычном кабеле.

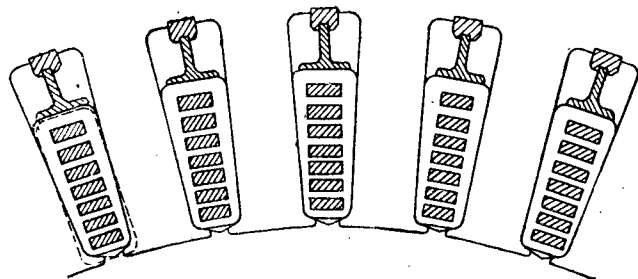


Рис. 8. Конструкция паза и пакета проводников высоковольтного турбогенератора

Обмотанный статор был испытан на пробой, причем группа «центральных» проводов испытывалась на напряжение 67 kV относительно земли, группа «промежуточных» на 45 kV, группа «наружных» на 25 kV.

Вычисленный реактанс равен 22%, а измеренный по опыту внезапного короткого замыкания он оказался равным 21% — это его величина, примерно равная комбинированному реактансу генератора обычной конструкции и плюсу повышающего

трансформатора (12,5 + 8,5%). Механические усилия, возникающие при опыте внезапного короткого замыкания, машина выдержала без всяких деформаций ее деталей.

Надо отметить, что если внезапное короткое замыкание происходит у зажимов вышеописываемого высоковольтного генератора и у зажимов генератора той же мощности, но на 11 000 В, то у последнего механическое напряжение между проводами получается почти втрое больше.

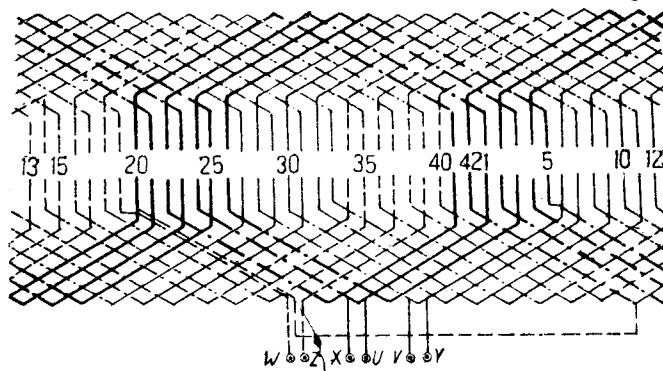


Рис. 9. Схема соединений «спиральной» обмотки высокого напряжения

Точно те же цели, что и Парсонс, преследовал и инженер фирмы Сименс-Шуккерт Эдвард Геринг, разработавший новую стержневую обмотку и новый паз для турбогенераторов высокого напряжения³.

Однако эти вопросы, особенно конструкция паза, получил совсем иное разрешение. В этой работе предлагается устройство трапецевидных пазов статора с тем, чтобы зубцы статора оказались с параллельными стенками; а так как пакеты отдельных проводников, закладываемых в паз и имеющие одинаковое прямоугольное сечение, имеют также форму прямоугольника, то, следовательно, гильза, изолирующая пакеты, оказывается обладающей стенками неодинаковой толщины (рис. 8).

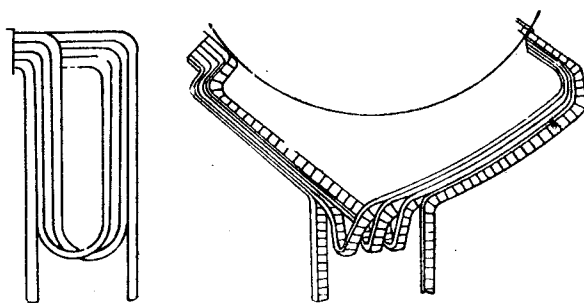


Рис. 10. Проекция лобовых соединений «спиральной» обмотки высокого напряжения

Автор этой работы предлагает специальную схему обмотки, имеющую цель создать последовательное повышение потенциала стержней, находящихся в каждом пакете, от внутреннего стержня, лежащего у отверстия паза и прилегающего к наиболее тонким частям стенок гильзы, к наружному, защищенному толстыми частями боковых стенок и донным концами гильзы. Предлагается соединить последовательно все проводники пазов одной фазы, лежащих у отверстия паза, подсоединить далее эту цепь к следующему слою проводников, соединенных также последовательно, и т. д.; первый проводник, лежащий у отверстия паза, будет соединяться в звезду с двумя аналогичными проводниками других фаз и затем приключаться к нейтрали, последние же проводники с периферии пазов представят, следовательно, фазовые концы обмотки. Схема обмотки с одним проводом на паз, которую автор называет спиральной, дана на рис. 9. Надо заметить, что эта схема совершенно аналогична схеме Парсонса.

Переход проводников из одной плоскости в другую представлен аксонометрически на рис. 10. Как видно, лобовые соединения получаются двухслойные и равномерно распределенные. В этой системе обмотки не требуется собирать

³ E. Hering, Eine neue Ständerwicklung für Turbogeneratoren hoher Betriebs- oder Prüfspannung, Siemens Zs., 1931, апрель, т. II, № 4, стр. 187. См. также реферат на эту статью, «Электричество», № 22, 1931.

ных шин, так как начало фаз можно, конечно, расположить у любого паза, относящегося к соответствующей фазе; следовательно, взять их вблизи щитка, как это изображено на рис. 9.

Трапецевидная гильза с пакетом проводников (рис. 8) вставляется в паз и затем заклинивается металлической ребристой планкой. Это очень важный момент в предлагаемой конструкции. Как известно, в обычных конструкциях миканитовая изоляция улучшается от опрессовки; в частности в конструкции Парсона гильза с пакетом проводников (у Парсона трехслойный кабель) при работе машины разбалтывается и изоляция рыхлится. В предлагаемой же конструкции гильза постоянно находится под давлением и плотно прижата к боковым стенкам. При этом кроме повышения диэлектрической прочности изоляционного материала гильзы, повышается также ее теплопроводность и теплоотдача стенкам паза. Кроме того, канал, в котором находится заклинивающая планка, используется для вентиляции, и воздух, энергично продуваемый сквозь этот канал, очень сильно охлаждает дно гильзы через ребристую планку, играющую и вторую, не менее важную, роль радиатора дна гильзы. Далее, параллельные стенки зубца обуславливают более легкую отдачу тепла через него в воздушный зазор, и вследствие более равномерного распределения индукции по зубцу железные потери в нем получаются меньше, а следовательно, уменьшается и количество выделяющегося тепла.

Все это позволяет ожидать уменьшения перегрева машины, и таким образом становится возможным данный строительный габарит машины использовать для большей мощности.

Повышение напряжения при этой конструкции оказывается возможным до 33–36 kV при непосредственном включении на кабельную сеть.

Турбогенератор, обмотанный таким образом, показан на рис. 11.

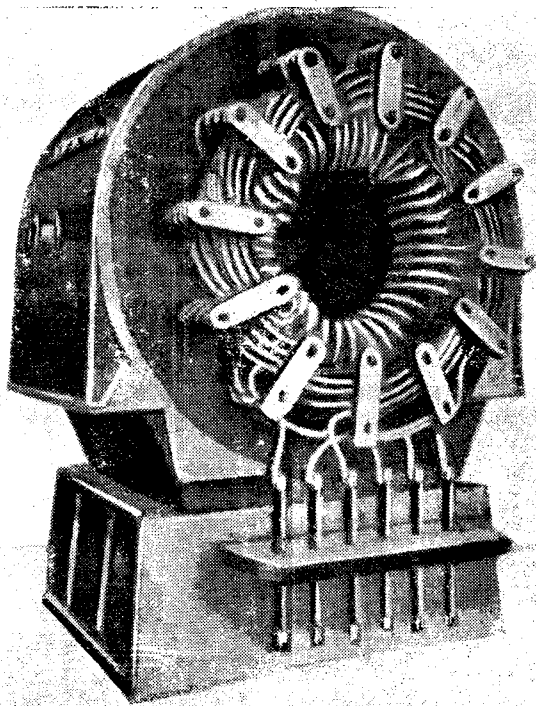


Рис. 11. Статор турбогенератора высокого напряжения со спиральной обмоткой

Сравнивая две вышеупомянутые работы, надо все же отметить работу Парсона. Основная цель в обоих случаях снизить, — сколько возможно, градиенты электрического поля в изоляции обмоток и добиться возможно более постоянной их величины. Величина этих градиентов и ее изменение в конструкции Парсона (рис. 7) оказывается в пределах от 18,9 kV/cm до 11,8 kV/cm, т. е. градиент возрастает на 0,6 своей наименьшей величины. В конструкции Сименс-Шукерт, если судить по схематическому чертежу (рис. 8) и считать, что потенциалы крайних стержней разнятся в семь раз (полагая нейтраль заземленной), а толщина изоляционной гильзы увеличивается от отверстия паза к его дну только

в 2,5 раза, мы получим возрастание градиента поля в стенке гильзы в $\frac{7}{2,5} = 2,8$ раза сравнительно с его наименьшей величиной у отверстия паза.

Обе эти конструкции высоковольтных турбогенераторов предполагают употребление в них обычно применяемой изоляции.

Фирма Броун-Бовери, оставляя конструкцию паза и обмотки машины обычной, сумела повысить напряжение на одном из своих турбогенераторов, построенном в 1930 г. и установленном на станции Centrales Électriques des Flandres et du Brabant, до 36 kV исключительно за счет улучшения качества изоляционных материалов. Как видно из сообщения фирмы⁴, ею была применена особого сорта изоляция из пропитанных лаком слюды и бумаги.

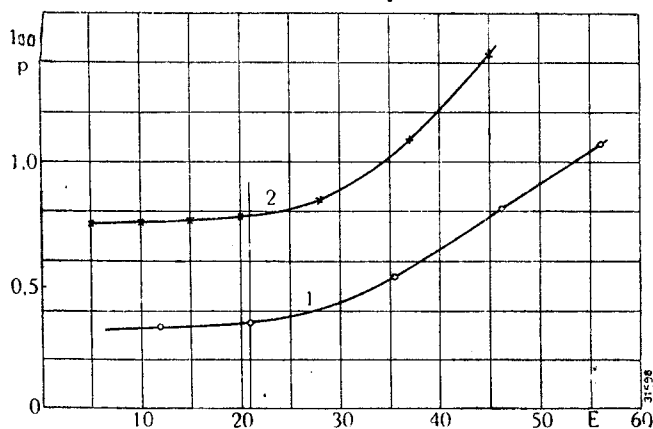


Рис. 12а. Изменение диэлектрических потерь в зависимости от напряжения: 1—в холодной машине, 2—в горячей машине

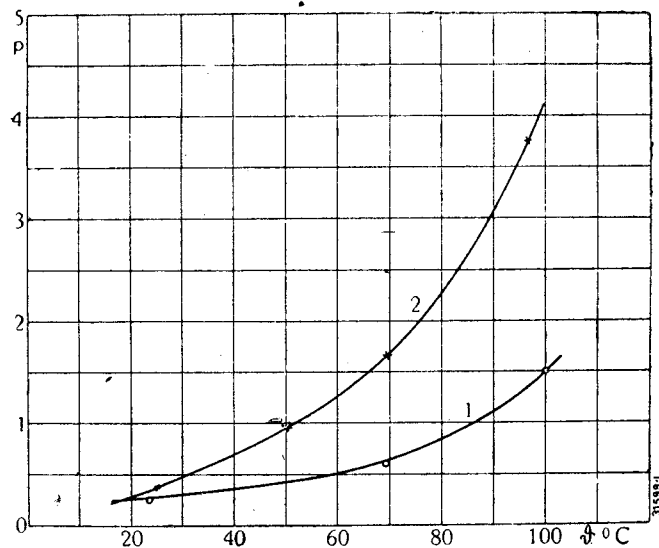


Рис. 12б. Изменение диэлектрических потерь в зависимости от температуры: 1—изоляции турбогенератора 2—порцеланового изолятора

На рис. 12а и 12б даны кривые потерь в этой новой изоляции, дающие потерю на 1 кв. дюйм изоляции при градиенте поля 10 kV/cm в зависимости от напряжения для холодной и горячей машины (рис. 12а) и от температуры (рис. 12б).

Как видно, получившиеся величины потерь малы как по абсолютной величине, сравнительно с потерями в миканитовой изоляции обычного типа, так и по разнице в холодной и горячей машине. Рост потерь существенно увеличивается при повышении напряжения выше половины номинального

($\frac{36\,000}{\sqrt{3}} = 20\,800\text{ V}$), что происходит за счет ионизации.

Хорошее качество новой изоляции подтверждает рис. 12б, где кривая потерь для порцелановой изоляции (проходные изоляторы), являющейся, вообще говоря, изоляцией высокого

⁴ „Rückblick auf die Entwicklung der Brawn Boweri-Konstruktionen im Jahre 1930“. BBC-Mitt., январь 1931.

качества, дает в зависимости от температуры почти в 2 раза большие величины потерь, чем новая изоляция. На рис. 13 дан общий вид статора этой машины.

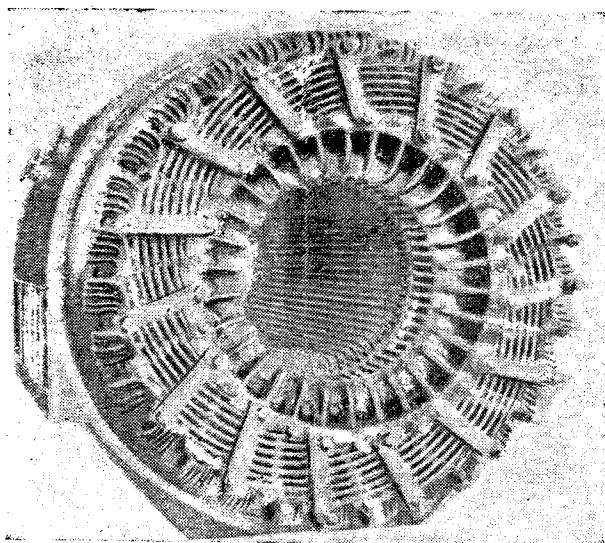


Рис. 13. Обмотанный статор турбогенератора Броун-Бовери на 26 000 V, установленного на Centrales Electriques des Flandres et du Brabant

В табл. 1 дана примерная сравнительная смета стоимости устройства агрегата нормального типа из генератора и повышающего трансформатора и из одного генератора высокого напряжения, взятая из вышеупомянутой статьи Парсонса.

Надо подчеркнуть, что особенно значительная экономия получается при устройстве с одним генератором высокого напряжения.

Таблица 1

Сводка объектов стоимости	Обычное устройство	Устройство с генератором высокого напряжения
Мощность генератора	94 000 kVA	94 000 kVA
Напряжение генератора	11 000 V	33 000 V
Приблизительная добавочная стоимость генератора	—	10 000 ф. ст.
Стоимость кабелей (проводка 100 ярд.)	3 675 ф. ст.	2 000 ф. ст.
Стоимость трансформатора	19 000 ф. ст.	—
Потери трансформатора:		
а) постоянные потери kW	250 kW	—
б) изменяющиеся потери при полной нагрузке	400 kW	—
в) изменяющиеся потери при 60% коэф. нагрузки	144 kW	—
Оборудование охлаждения трансформатора:		
а) мощность мотора	50 kW	—
б) сокращение расходов на постройки	—	500 ф. ст.
Годовая стоимость постоянных потерь	1 400 ф. ст.	—
Годовая стоимость изменяющихся потерь	925 ф. ст.	—
Капитализированная стоимость потерь трансформатора из расчета 10%	23 250 ф. ст.	—

Как видно из табл. 1, применение машины на 33 kV дает экономию в 44 425 фунтов стерлингов, из которых пущо вычесть расход на дополнительную стоимость машины 33 kV. Чистая экономия выразится, следовательно, в 34 400 фунтов стерлингов.

В случае необходимости повысить напряжение генератора до 66 kV явится выгодным применить машину на 33 kV и повысить ее напряжение до 66 kV с помощью автотрансформатора. Смета стоимости устройства для этого случая приведена в табл. 2. Величина общей экономии при генераторе в 33 kV выразится суммой 19 225 фунтов стерлингов минус 10 000 фунтов стерлингов; чистая экономия будет около 9 000 фунтов стерлингов. Эти цифры приблизительны и относятся по времени к 1928/29 г., однако они весьма наглядно иллюстрируют выгоду применения высоковольтного генератора.

Таблица 2

Сводка объектов стоимости	Обычное устройство	Устройство с генератором высокого напряжения
Напряжение генератора	11 000 V	33 000 V
Стоимость кабелей (проводка 100 ярд.)	3 675 ф. ст.	2 000 ф. ст.
Стоимость автотрансформаторов	16 000 ф. ст.	9 750 ф. ст.
Капитализированная стоимость потерь	20 000 ф. ст.	12 500 ф. ст.
Сокращение расхода на постройки	—	1 000 ф. ст.
Стоимость переключающего механизма	9 000 ф. ст.	6 200 ф. ст.

Из вышеизложенного следует, что электрические генераторы в их нормальном выполнении в настоящее время с большим трудом могут быть приспособлены для непосредственного включения на линию передачи высокого напряжения и работают на сеть через повышающий трансформатор, этим самым создается достаточно надежная установка.

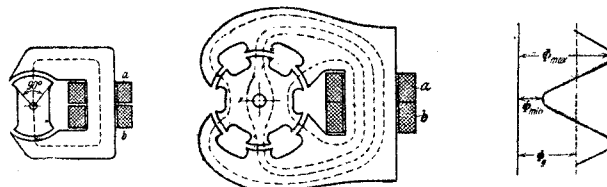


Рис. 14. Принцип работы высоковольтной синхронной машины с цилиндрической обмоткой статора

Обмотки генератора переменного тока защищены от перенапряжений в линии самым трансформатором. Поэтому задача создания высоковольтного генератора переменного тока, работающего без трансформатора, может быть успешно разрешена только тогда, когда во всех отношениях и со стороны стоимости и надежности подобный генератор будет лучше современного рабочего звена станции генератор + трансформатор, при этом, как мы видели, будут уничтожены рабочие

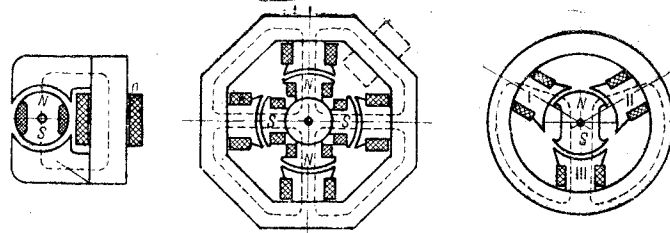


Рис. 15. Высоковольтная машина с цилиндрическими обмотками статора и обмоткой возбуждения на роторе

потери и установочная стоимость трансформаторов. Однако, такой генератор должен иметь рабочее напряжение высоковольтной обмотки повысительного трансформатора линии передачи, и его обмотки должны быть изолированы настолько надежно, чтобы выдержать все перенапряжения линии передачи.

Одной из интересных и стоящих на правильном пути попыток создать подобный высоковольтный генератор является задача возбуждать высокое напряжение непосредственно в высоковольтной обмотке трансформатора, допустив все промежуточные звенья, каковыми являются низковольтные обмотки статора синхронных машин. Если бы удалось осуществить

подобный высоковольтный генератор, то он бы имел цилиндрическую обмотку статора, не лежащую в пазах, которую является возможным погрузить в масло, как в трансформаторе.

На рис. 14 изображен принцип действия таких машин, который высказывали еще Mordey и Kingdon⁵.

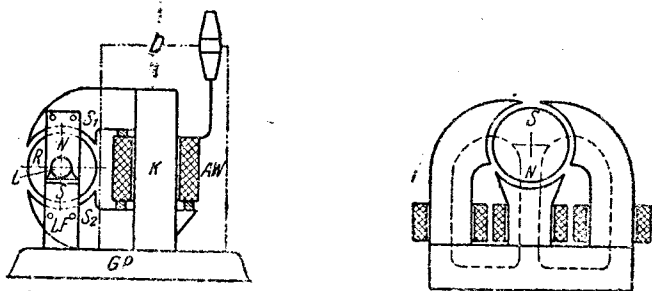


Рис. 16. Конструктивное выполнение двухполюсных высоковольтных машин с цилиндрическими обмотками

Ротор представляет тело соответствующей формы, набранное из листового железа и укрепленное на валу. При вращении ротора меняется сопротивление магнитной цепи; при этом магнитное поле флюктуирует и в обмотке якоря a наводит желательной величины и частоты э. д. с. Недостатком такой машины является то, что в лежащей на неподвижной части магнитопроводов обмотке возбуждения a постоянного тока наводится также переменная э. д. с., и использование железа такой машины незначительно, ввиду присутствия значительной постоянной составляющей потока в магнитопроводе. Более совершенными являются аналогичные конструкции для возбуждения⁶, как показано на рис. 15.

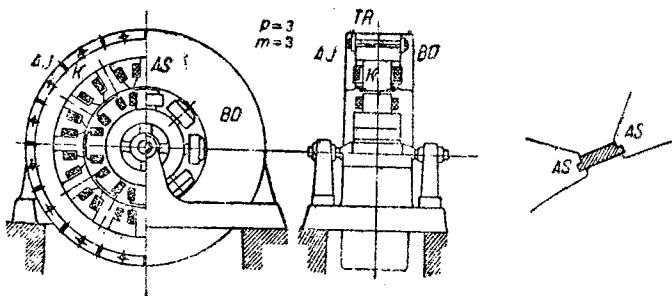


Рис. 17. Конструктивное выполнение многополюсной высоковольтной машины с цилиндрическими обмотками

На рис. 16 и 17 представлены конструктивные формы подобных высоковольтных генераторов. Преимуществами конструкций таких высоковольтных генераторов является возможность погружения высоковольтной обмотки в масло и большая простота его выполнения вследствие отсутствия необходимости закладывать обмотку в пазы. Кроме того, меди на обмотку якоря подобной машины пойдет меньше вследствие отсутствия неактивных частей; потери в меди будут также меньше. Недостатками такой машины является больший вес железа и появление высших гармонических в большей степени, чем в нормальных машинах.

Защита генераторов переменного тока высокого напряжения при их непосредственном включении в сеть

Вопрос о защите электрических машин, включаемых непосредственно в линии передачи, от влияния различных перенапряжений, возникающих на линии, является делом совсем новым, и достаточно подробных исследований на эту тему в технической литературе имеется очень мало.

Надо отметить две работы по этому вопросу, работу F. D. Filder и Edward Beck, „Влияние блуждающих волн на электрические вращающиеся машины и способы защиты от них“ (Transactions of AIEE, октябрь 1930 г.) и работу E. W. Bosche, „Колебательные процессы в обмотке статора электрической машины под влиянием волновых импульсов“ (Transactions of AIEE, октябрь 1930 г., а также реферат в журнале „Электричество“, № 14, 1931 г.).

Задача защиты машины распадается на 2 части: во-первых, ограничение потенциала блуждающих волн, попадающих в машину в линии передачи между обмоткой машины и землей, и во-вторых, ограничение крутизны фронта волны, входящей в обмотку.

Ограничение потенциала волны, входящей в обмотку машины, защитит изоляцию обмотки от пробоя на землю, а ограничение крутизны фронта волны обезопасит междувитковую изоляцию, так как в случае волны с крутым фронтом, идущей по обмотке, потенциал витка, в который волна входит, резко повышается, тогда как потенциал смежных витков остается почти без изменения, — пространственно же витки могут быть разделены только междувитковой изоляцией и такое распределение потенциала может создать в изоляции перенапряжение. На рис. 18 наглядно представлено, как сильно уменьшается разность потенциалов между соседними витками при волне с крутым и пологим фронтом.

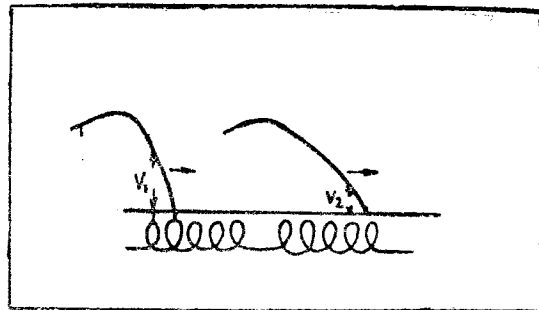


Рис. 18. Влияния крутизны фронта волны, входящей в обмотку, на междувитковую разность потенциалов. Максимальный потенциал обеих волн один и тот же

Кроме того, волна с крутым фронтом вызывает более резкие резонансные явления, могущие образовать колебание в обмотках машины.

Для ограничения потенциала входящей волны обычно применяется разрядник⁷, которым шунтируется на землю сторона высокого напряжения машины. Однако разрядник, ограничивая потенциал волны, совершенно не влияет на крутизну ее фронта, и для его сглаживания приходится принимать другие меры.

Здесь можно идти двумя путями — или сглаживать фронт волны до ее входа в обмотку или создать соответствующее устройство, которое обезопасило бы обмотку от входящей в нее волны с крутым фронтом.

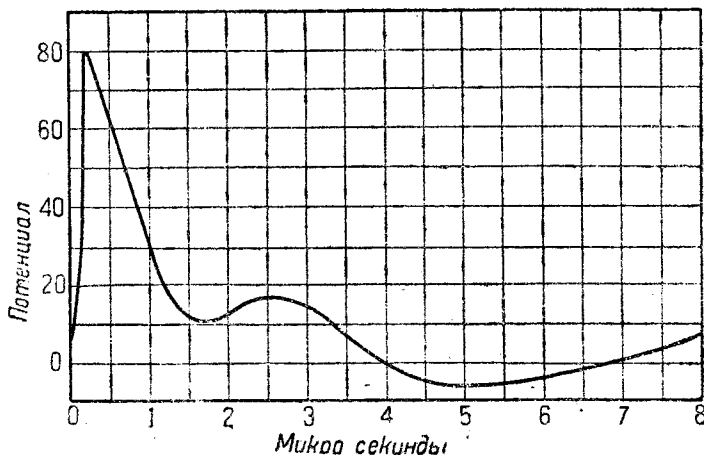


Рис. 19. Кривая изменения разности потенциалов на первой секции обмотки высоковольтной машины в процентах от потенциала входящей волны

Сглаживание фронта волны может быть достигнуто включением перед машиной дроссельной катушки, причем иногда последнюю может заменить реактор, применяемый и для других целей. В таком случае эффективность использования реактора будет увеличена. Для этой же цели может применяться конденсатор, шунтирующий высокое напряжение машины параллельно разряднику. Схемы соединения разрядника, дросселя и конденсатора применяются самые разнообразные.

⁷ См. вышеупомянутые работы.

⁵ Ка р р, „Dynamomaschinen“, 1. Auflage.

⁶ К u d r n a, Nutenlose oder Hochspannungs Synchronmaschine, Arch. für Elektrotechnik, 1930. В статье дана подробная теория и метод расчета таких машин.

Для того чтобы обезопасить обмотки от внутренних междувитковых перенапряжений, в случае если в них входит волна с крутым фронтом, приходится применять приключения различных приспособлений к внутренним точкам обмотки.

В вышеуказанной статье Фильдера и Бекка помещен любопытный подсчет увеличения разности потенциалов на некоторой части обмотки машины под влиянием волны с крутым фронтом. Рассматривается машина на 22 000 V, 60 пер/сек с заземленной нейтралью. Фазовое напряжение ее будет

$$\frac{22\,000}{\sqrt{3}} = 12\,700 \text{ V}; \text{ вся фазовая обмотка разделена на}$$

8 частей и от каждой секции сделано ответвление. Как видно из рис. 19, взятого из той же статьи, дающего картину распределения потенциала в первой секции обмотки машины при волне с крутым фронтом (в $1/2$ микросекунды), разность потенциалов на концах этой секции, в первую половину микросекунды с того момента как волна дойдет до обмотки, достигает примерно 80% от потенциала приложенной волны. Перед машиной включен разрядник, ограничивающий потенциал волны до эквивалентного напряжения, при 60 пер/сек обычно не превосходящего нормальное фазовое напряжение более чем в 3,5 раза, в данном случае до 44 000 V. Следовательно, максимальная разность потенциалов на 1 секции в первую половину микросекунды после падения волны на обмотку будет 80% от 44 000, т. е. 34 000 V. Нормальная же разность потенциалов, приходящаяся на каждую секцию при стационарном режиме линии, будет

$$\frac{12\,700}{8} = 1\,600 \text{ V}; \text{ следовательно, увеличение этой разности для первой секции обмотки будет в } 34\,000 : 1\,600 = 21 \text{ раз, тогда как при равномерном распределении потенциала этой волны по обмотке на каждую секцию приходилась бы разность потенциалов в } 44\,000 : 8 = 5\,500 \text{ V, которая была бы больше нормальной в } 5\,500 : 1\,600 = 3,5 \text{ раза.}$$

Как видно из рассмотренного примера, выравнивание распределения потенциала по обмотке является весьма актуальным вопросом. Подобное выравнивание можно осуществить, шунтируя отдельные части обмотки конденсаторами или разрядниками. Конденсаторы пропускают волну перенапряжения к внутренним точкам обмотки раньше, чем она пройдет по проводникам обмотки, и тем самым создают лучшее распределение потенциала. Подобное присоединение конденсаторов или разрядников к внутренним точкам обмотки особенно удобно осуществить в конструкции лобовых соединений, предложенной Парсонсом.

По опытам Фильдера и Бекка оказалось, что, приключая конденсатор емкостью 0,004 μF между высоковольтной стороной машины и первым ответвлением от обмотки машины, конденсатор в 0,004 μF —между стороной высокого напряжения

и третьим ответвлением и конденсатор в 0,002 μF —между стороной высокого напряжения и пятым ответвлением, удалось добиться распределения потенциала при волне в $1/2$ микросекунды так, что максимальная разность потенциала на каждом из ответвлений была за все время прохождения волны не более 25% от потенциала приложенной волны. Так как обмотки разделены на 8 секций, то при идеальном распределении потенциала на каждую секцию пришлось бы по 12,5% от потенциала приложенной волны.

Применение разрядников, шунтирующих отдельные секции обмотки на стороне высокого напряжения, дало такие же благоприятные результаты (наибольшие разности потенциалов оказались немногим больше 20% от потенциала приложенной волны).

Кроме явления неравномерности распределения потенциала за счет крутизны фронта волны в обмотке машины могут возникать опасные колебания вследствие отражения волны от нейтрального провода.

Машинные обмотки, как показал Боне⁸, можно рассматривать как короткую линию передачи, обладающую определенной волновой характеристикой. В случае, если нейтраль оказывается изолированной, то волна перенапряжения, не превосходящая нормы разрядника, шунтирующего стороны высокого напряжения машины, попадая в машину, отразится от изолированной нейтрали с удвоением своего потенциала, и возвращаясь обратно к стороне высокого напряжения, обусловит возникновение в обмотке колебаний, которые производят местные возрастания потенциала, значительно большие нормы разрядника, и следовательно, создающие угрозу пробоя. Колебательный характер изменения разности потенциалов замечен на рис. 14. Разрядник может заработать и под влиянием удвоенного потенциала отраженной волны, возвращающейся из машины; однако это его действие не спасет обмотку от пробоя. Как известно, отражения от конца линии не произойдет, если в ее конце включено сопротивление, равное волновой характеристике линии. Таким образом, для защиты машины в нейтраль следует включать сопротивление, не превосходящее величины волновой характеристики обмотки машины. В качестве такого сопротивления удобно применять так называемое тайритовое реле⁹, которое, обладая падающей характеристикой, представляет большое сопротивление при нормальном напряжении и тем самым ограничивает ток утечки до малых долей ампера, при повышении же напряжения сильно снижает свое сопротивление, устраняя таким образом опасность отражения волны от изолированной нейтрали.

Резюмируя сказанное о защите, можно заключить, что защищать машину нужно не только ограничением потенциала падающих импульсов, но следует также предусматривать возможность защиты от неравномерностей распределения потенциалов по обмотке и отражений их от нейтрали.

Новое в вентиляции турбогенераторов

Н. П. Иванов
Ленинград

Задача настоящей статьи—дать критическое рассмотрение передового технического опыта в данной области электромашиностроения, в области вентиляции турбогенераторов.

В последних конструкциях двухполюсных турбогенераторов передовых европейских фирм Сименс-Шуккерт и Броун-Бовери отсутствует внутренняя вентиляция ротора. Это усовершенствование, на первый взгляд кажущееся парадоксальным, как мы увидим ниже, безусловно, имеет основания и разрешает многие актуальные вопросы при построении машин возрастающей мощности, поставив вентиляцию машины вне всякой зависимости от ее длины.

Эта задача в отношении статоров была разрешена ранее в американских конструкциях применением вентиляции с многократным впуском воздуха в статор (рис. 1).

В отношении роторов дело обстояло хуже вследствие более тяжелых условий работы ротора в тепловом отношении. Ротор, являясь сердцевинной машины, окруженной теплоотдающими поверхностями статора, имеет возможность продувания воздуха только с концов. Применяемые же до сих пор роторные обмотки с изоляцией класса А, т. е. с применением бумажной ткани, требовали интенсивной вентиляции в целях поддержания допустимых перегревов.

Примером такой вентиляции может служить очень распространенная и дошедшая до наших дней конструкция Броун-Бовери, показанная на рис. 2. Большим недостатком этой

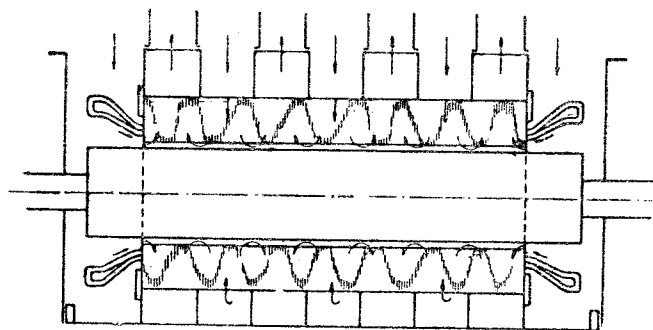


Рис. 1

⁸ Е. В. В о е h n e, Колебательные процессы в обмотке статора электрических машин, Transaction of AIEE, октябрь, 1930.

⁹ Электричество, 1931, № 15, а также вышеупомянутую статью Боне.

конструкции является то, что охлаждающие поверхности (каналы) расположены не в самой горячей зоне, которая находится ближе к периферии, где сосредоточены кроме омических потерь в обмотке также и потери на трение. Последние по величине значительно превосходят омические. Поэтому естественно стремление в более поздних конструкциях отнести

определенной границы идет почти исключительно за счет удлинения активной части, и потери в роторе возрастают пропорционально его длине. Сечение же входных каналов для воздуха определяется в зависимости от диаметра ротора и условий его механической прочности. При возрастании мощности машины диаметр ротора или остается постоянным, или незна-

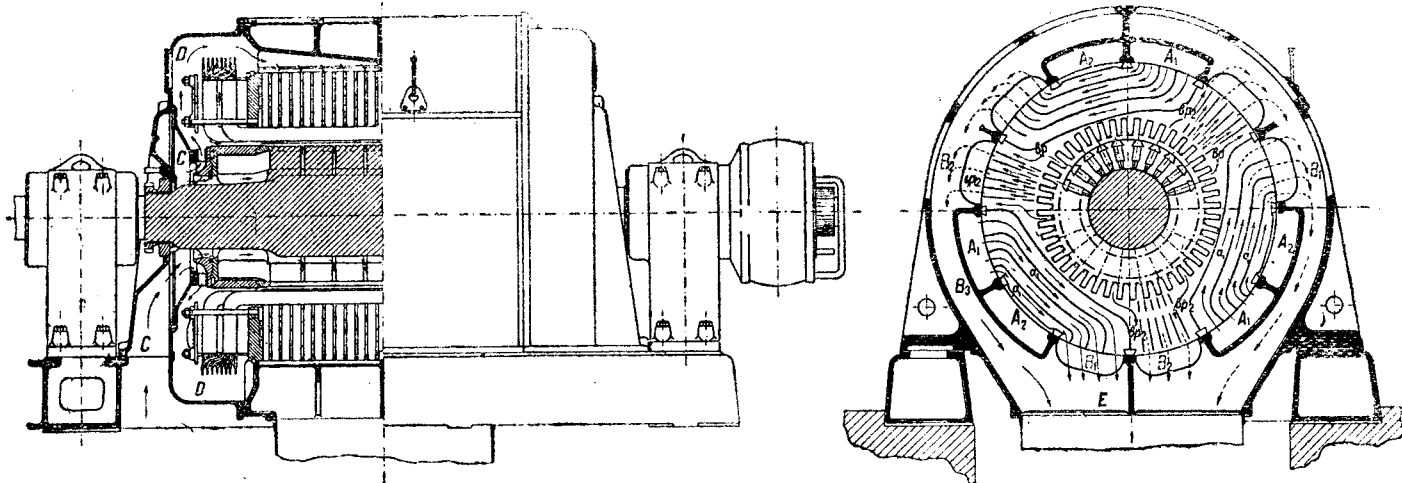


Рис. 2

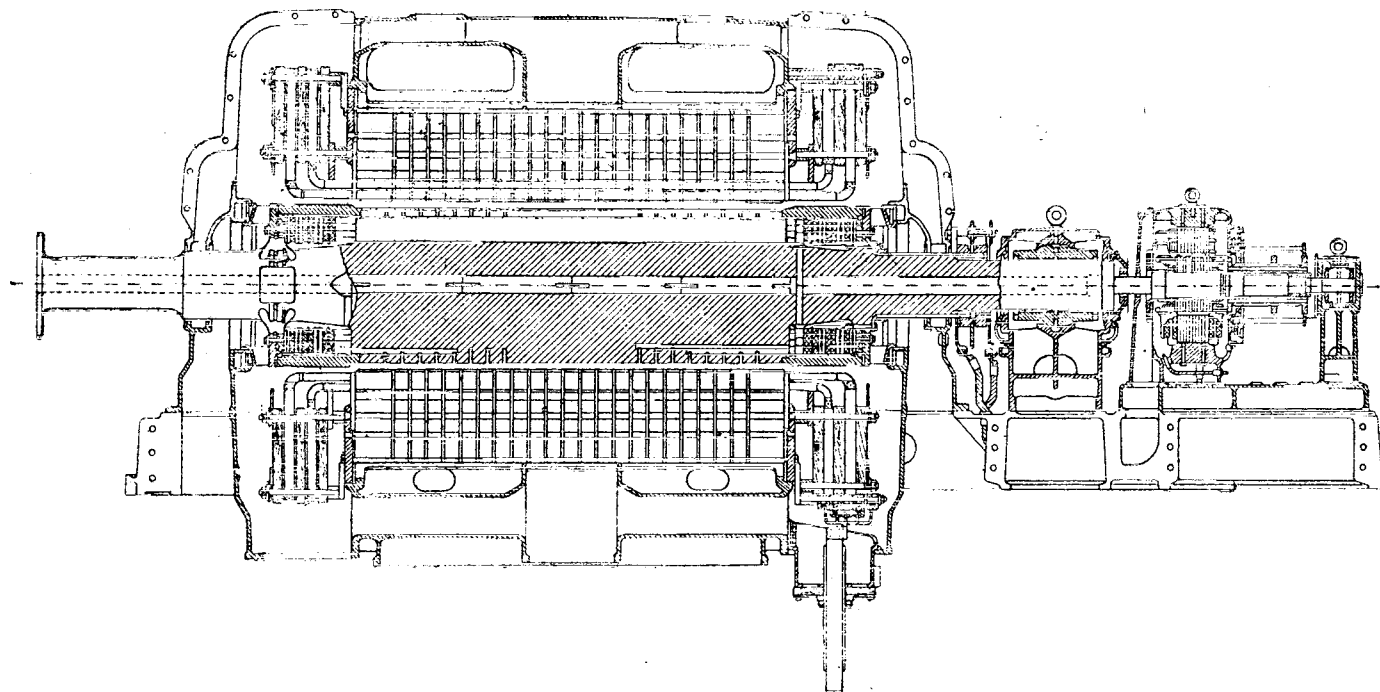


Рис. 3а 1—вентиляционные каналы

охлаждающие каналы ближе к поверхности. Таковы, например, конструкции Сименс-Шуккерта со сверловкой зубцов (рис. 3) и Бергмана и Эрликсона с фрезеровкой зубцов (рис. 4). Эти конструкции вентилируемых роторов, сопряженные с радиальной системой вентиляции статоров с продуванием воздуха через зазор, давали удовлетворительное охлаждение по активной длине ротора для малых и средних машин. Лобовые же части обмотки, окруженные плохо проводящими тепло изоляционными материалами, имеют наибольший перегрев. Охлаждение их через отверстия в капках вызвало трудности в механическом расчете кап и в изоляции их от обмотки, сводя в конечном итоге эффект от этой вентиляции к практически незначительной величине.

По опытам Сименс-Шуккерта отверстия в капках снижали средний перегрев обмотки на 1°C . При возрастании мощности строящихся турбогенераторов, а следовательно при возрастании их длины, появляется значительная неравномерность нагрева по длине ротора, так как подаваемый с концов воздух, доходя до середины длины ротора, успевает достаточно прогреться и теплоотдача поверхностями каналов падала¹. Кроме того, повышение мощности генераторов после

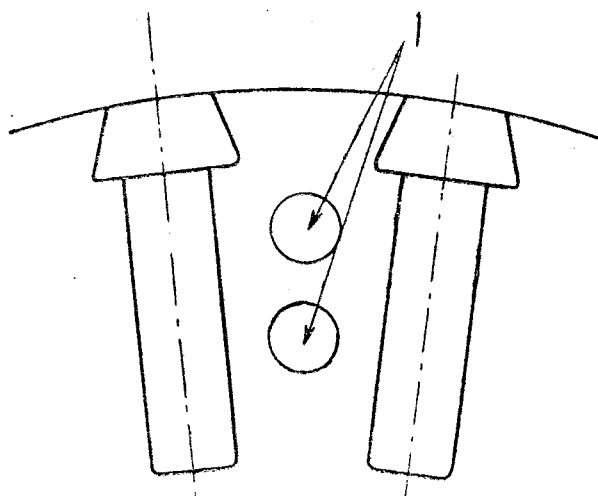


Рис. 3б

¹ По опытам завода Эрликсона перегрев воздуха в зазоре в центре машины достигает 30°C при длине активной части машины около 2,5 м.

чительно увеличивается; условие же механической прочности вызывает все большие затруднения в создании вентиляционных каналов, причем если еще учесть, что вентилирующая

ляемых почти только интенсивностью охлаждения с поверхности ротора. Так как надежность и долговременность изоляции определяются существующими максимальными перегревами,

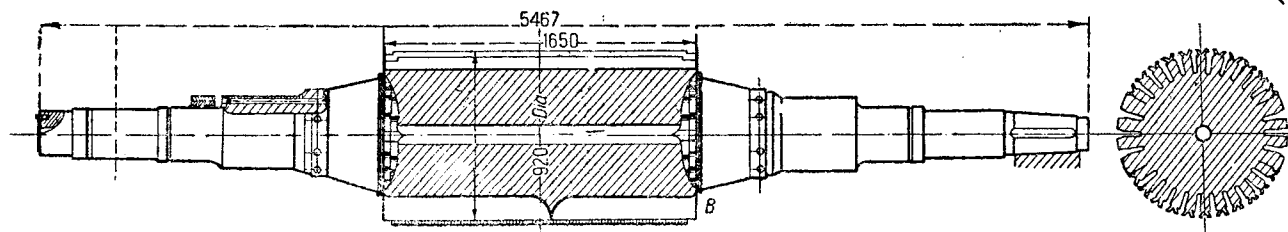


Рис. 4

способность ротора, которая обеспечивает, главным образом, скорость продвигания воздуха внутри ротора, также определяется окружной скоростью на поверхности ротора, которая зависит от диаметра и, следовательно, тоже не изменяется, то при возрастании мощности в отношении абсолютного коли-

то этим была поставлена задача повышения допустимых рабочих перегревов роторных обмоток, в результате чего были применены запеченные роторные обмотки с изоляцией класса В, т. е. с применением только термостойких изоляционных материалов (миканит, асбест).

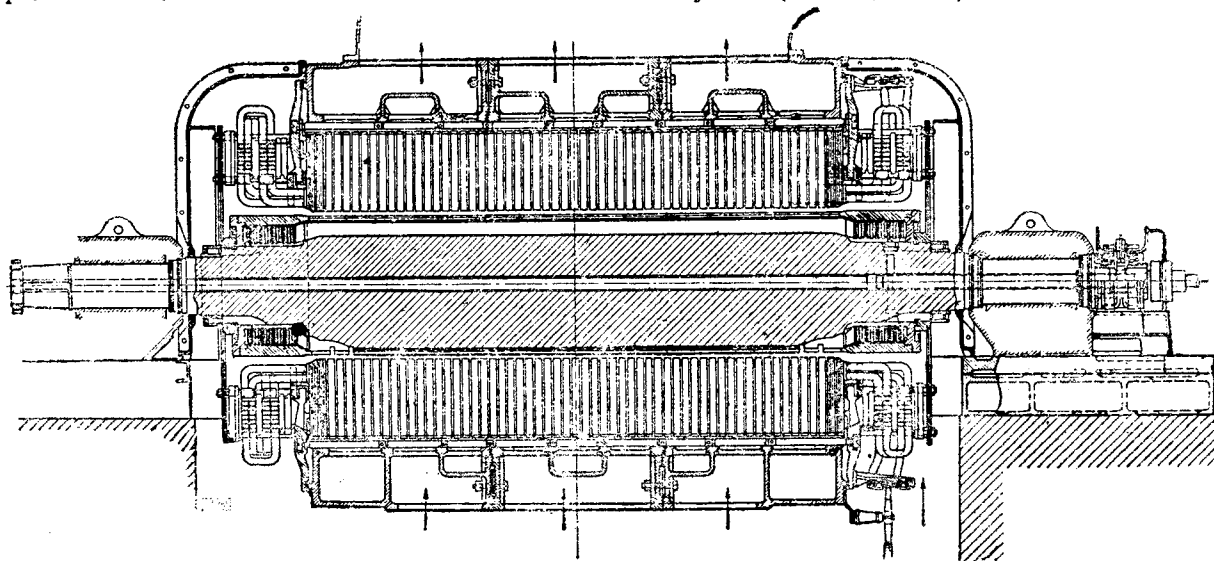


Рис. 5а

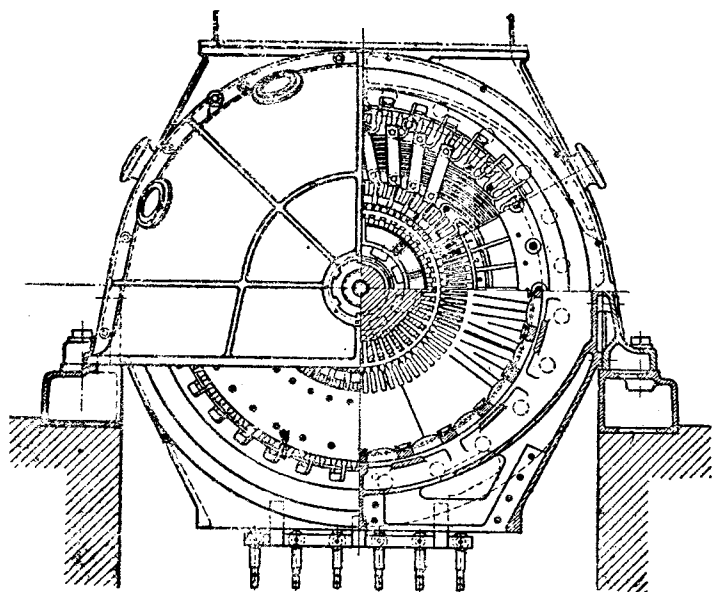


Рис. 5б

чества воздуха мы имеем отрицательный баланс, т. е. снижение его, а на единицу потерь—уменьшение, прямо пропорциональное увеличению длины при постоянном диаметре.

Таким образом при охлаждении длинных роторов столкнулись с фактом наличия в центре машин температур роторной обмотки, не зависящих от внутренней вентиляции и опреде-

Механически эта изоляция закрепляется опрессовкой обмотки под нагревом и выпечкой ее до состояния затвердения скрепляющих веществ—лаков. Соответственно этому нормы рабочих перегревов рабочих обмоток для такого типа изоляции были повышены до 90°C при температуре входящего воздуха 35°C . Этим был разрешен вопрос термостойкости изоляции в отношении местных температурных перегревов.

Далее, естественно, появилось стремление к снижению этих перегревов, которые, как указывалось, определяются охлаждением ротора с поверхности, для чего необходимо в зазор продувать возможно большее количество воздуха. С этим роторная вентиляция утрачивает свою самостоятельность и входит в соотношение с вентиляцией статора, так как подойти к поверхности ротора в зазор можно лишь через вентиляционные каналы статора. Этому требованию подачи максимального количества воздуха в зазор отвечает вентиляция с многократным впуском воздуха (рис. 1). Подачей воздуха в зазор достигается более интенсивное охлаждение не только ротора, но и всей машины, так как зазор представляет собой наиболее горячую зону машины. Поверхности, образующие зазор, обладают наибольшей теплоотдачей, так как воздух снимает тепло с торцев статорного железа, и по пути теплового потока нет последовательно включенных, плохо проводящих тепло, изоляционных прослоек.

Если мы попытаемся все-таки из этой общей системы вентиляции мысленно выделить вентиляцию ротора, то уничтожая внутренние каналы за счет более интенсивного охлаждения с поверхности, ее можно себе представить логическим завершением процесса наибольшего возможного отнесения к периферии теплоотдающих поверхностей воздушных каналов внутренней вентиляции роторов (ср. вентиляцию роторов Броун Бовери (рис. 2), Сименс Шуккерта (рис. 3), Эрликона (рис. 4)).

Системой вентиляции с многократным впуском воздуха в зазор удастся достичь равномерного и достаточного интенсивного охлаждения роторных обмоток по всей длине активной части.

Повышение рабочих перегревов роторной обмотки и повышенная теплопроводность изоляции (тонкий миканит) повысили температуру поверхности ротора, а с этим и способность ее к теплоотдаче вследствие увеличения разности температур теплоотдающей поверхности и охлаждающей среды, и позволили с поверхности ротора отводить все тепло, не прибегая к внутренней вентиляции, т. е. без специальных вентиляционных каналов в теле ротора. Так были выполнены турбогенераторы мощностью 45 000 kVA, 3 000 об/мин, построенные фирмой Броун-Бовери в 1930 г. (рис. 5), и турбогенератор мощностью 80 000 kVA, 3 000 об/мин, построенный фирмой Сименс-Шуккерт в 1931 г.

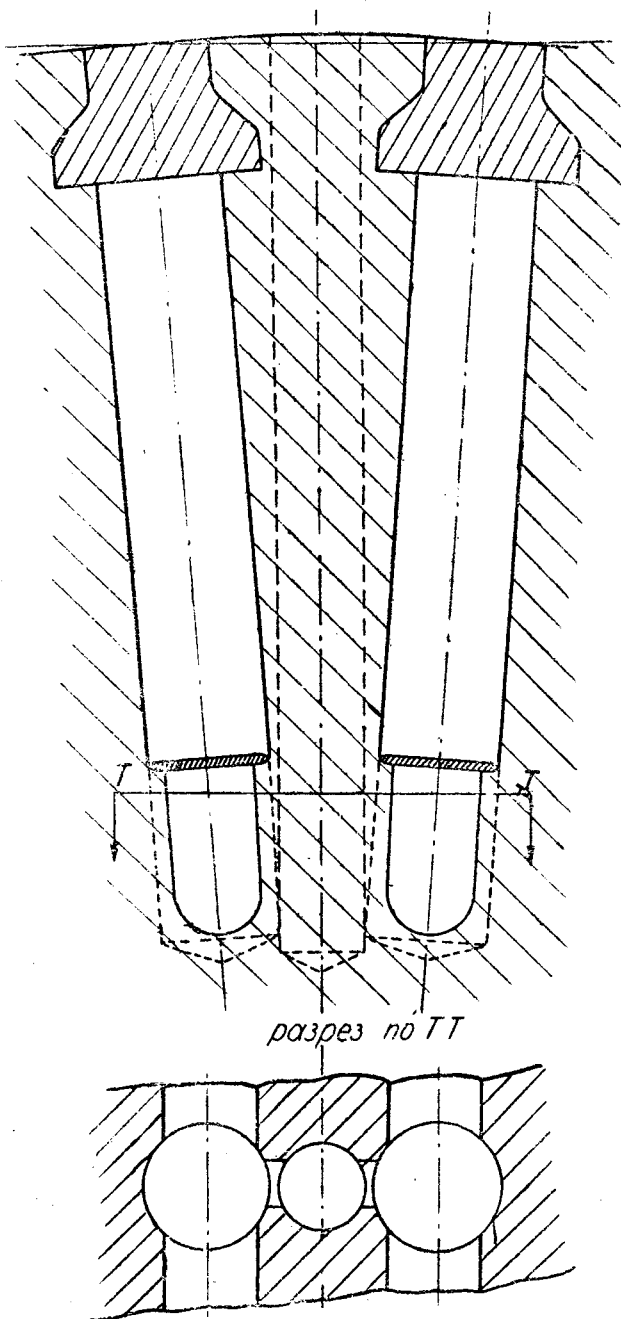


Рис. 6

С применением этой вентиляции значительно облегчается проблема механических напряжений в материале ротора, так как внутренние каналы для вентиляции всегда в той или иной степени ослабляют механическую прочность частей ротора. Кроме того, снимая с ротора роль вентилятора, повышается к. п. д. общей вентиляционной установки, так как к. п. д. специальных вентиляторов значительно выше к. п. д. ротора как вентилятора. Наконец, здесь отпадает вся дополнительная обработка поковки ротора, связанная с устройством вентиляционных каналов, чем достигается некоторое удешевление машины.

Эта обработка зачастую бывает одной из самых сложных и трудоемких работ по ротору; см., например, показанную на рис. 6 обработку ротора в американских конструкциях.

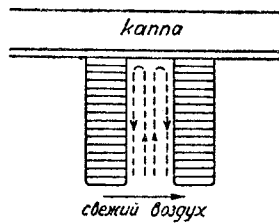


Рис. 7

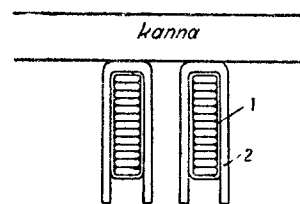


Рис. 8. 1—изоляция, 2—алюминиевая коробка

В случае высоких тепловых нагрузок ротора теплоотдающая поверхность ротора может быть увеличена созданием рифления на поверхности бочки ротора, которое дает снижение средней температуры обмотки ротора на $10 \div 15^\circ \text{C}$, но увеличивает потери на трение о воздух.

Особо нужно остановиться на вентиляции лобовой части, которая и при данной системе вентиляции остается наиболее нагретой частью роторной обмотки. Для охлаждения лобовых частей необходимо создать обмен воздуха под каппой с выпуском его или через отверстия в каппах (что несет затруднения при механическом расчете кап и в изоляции обмотки от каппы), или через отверстия, просверленные в зубцах, — способ применяемый фирмами Сименс-Шуккерт и Броун-Бовери. Кроме того, охлаждение лобовой части осуществляется циркуляцией воздуха между катушками, которая возникает при вращении ротора вследствие различной плотности слоев подогреваемого катушками воздуха (рис. 7). Поэтому чрезвычайно вредно забивать лобовую часть распорками, их должно быть возможно меньше, последнее диктуется еще и тем обстоятельством, что лобовая часть должна иметь свободу перемещения, вызываемого температурным удлинением обмотки вследствие разности температур меди и железа.

В этом отношении очень удачна американская конструкция укрепления лобовых частей роторной обмотки (рис. 8 и 9), так как алюминиевые или медные коробки, покрывающие катушку, отводят тепло с широкой стороны катушек к хорошо охлаждаемой каппе, а концы коробок, обращенные внутрь,

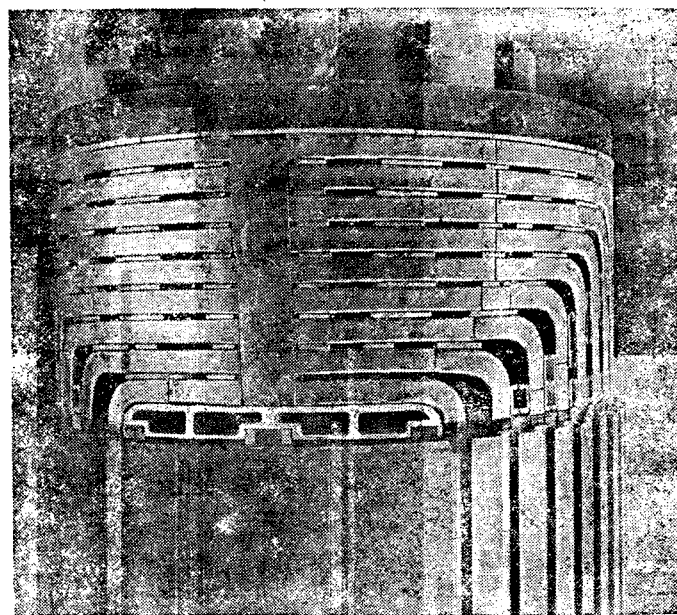


Рис. 9

отдают тепло обтекающему их воздушному потоку под лобовой частью. К созданию воздушных каналов увеличенного сечения в большом зубце нужно относиться осторожно, так как такие каналы представляют собою мало эффективный шунт для воздуха и могут уменьшить расход воздуха в каналах малых зубцов (более эффективных в отношении охлаждения), в особенности, если вход воздуха под каппу затруднен. Но в то же время каналы в большом зубце, безусловно,

могут быть получены при наличии на роторе аксиальных вентиляторов, которые создают более благоприятные условия для входа воздуха под каппы.

„Невентилируемые“ роторы были впервые применены, как и вытекает из изложенного, на генераторах большой мощности при больших длинах. Малые же машины в отношении поверхностного охлаждения имеют более выгодные условия, так как уменьшение объема и мощности происходит пропор-

ционально кубу линейных размеров, а уменьшение поверхности пропорционально квадрату линейных размеров; следовательно, с уменьшением мощности количество тепла, отводимое с единицы поверхности, уменьшается. Но, как и для больших машин, необходимым условием для осуществления вентиляции ротора с поверхности являются продувание воздуха через зазор и применение запеченных роторных обмоток с высоким классом изоляции.

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ ТРАНСПОРТА

Выбор мощности и количества подстанций для трамваев

А. Зильберталь
Ленинград

Социалистическая реконструкция городского хозяйства и быстрый рост трамваев СССР требуют расширения оборудования для преобразования переменного тока в постоянный. Недостаток этого оборудования на большинстве трамваев пожалуй еще более острый, чем недостаток вагонов. Установленной мощности не хватает даже для существующего объема движения. Почти везде подстанции работают с перегрузкой агрегатов, зачастую без минимального резерва. Учитывая еще ожидаемый резкий рост числа вагонов, мы на многих трамваях должны будем удвоить и утроить общую установленную мощность в течение 2—3 лет.

Направление этого роста, выбор технических правильных решений как в общей постановке, так и в каждом отдельном случае имеет огромное значение. Из всех технико-экономических вопросов, возникающих при расширении преобразовательного оборудования, пожалуй наибольшую остроту в настоящий момент приобретает вопрос о правильной расстановке существующих и новых подстанций по городу, для чего в первую очередь нужно иметь ориентировку в отношении целесообразного количества подстанций при данном объеме движения или, иначе говоря, наиболее целесообразной мощности для каждой подстанции.

Хотя положение каждой подстанции определяется по местным условиям, но без такой общей ориентировки мы рискуем или наметить слишком много преобразовательных точек или, наоборот, сделать сеть этих точек слишком редкой. В первом случае, разбивая мощность, необходимую для движения, на слишком мелкие единицы, мы имеем следующие основные недостатки:

1) при малом числе рабочих машин на подстанции уменьшается возможный коэффициент загрузки рабочих машин даже в час максимума;

2) при малом количестве вагонов на одну подстанцию колебания нагрузки дают довольно резкие пики, вследствие чего необходимая расчетная мощность подстанции на один вагон для малых подстанций повышается;

3) для малых подстанций повышается общий установленный резерв.

В результате указанных причин повышается общая установленная мощность на вагон, а именно:

1) чем меньше установленная мощность, тем больше необходимый объем здания на установленный киловатт;

2) для малых агрегатов стоимость самых агрегатов повышается (на единицу мощности);

3) для малых подстанций возрастает доля расхода на распределительное устройство;

4) чем больше отдельных мелких подстанций, тем больше требуется кабелей высокого напряжения и масляников на отходящих пунктах высокого напряжения.

В итоге капитальные затраты на вагон для мелких подстанций сильно возрастают по сравнению с крупными, именно:

1) чем больше подстанций, тем больше персонала необходимо для их обслуживания и дежурств на них;

2) чем больше подстанций, и, следовательно, чем больше их стоимость, тем больше и расходы по содержанию и ремонту машин и оборудования.

В соответствии с последними двумя пунктами мы для малых подстанций получим и значительное увеличение текущих расходов на вагон.

В обратном случае, если мы концентрируем всю мощность на небольшом числе очень крупных подстанций, то, удеше-

вляя подстанции, мы значительно повышаем стоимость кабельной сети и ее содержание, а именно: а) повышаются длины кабелей как положительных, так и отрицательных; б) в ряде случаев повышаются и необходимые сечения кабелей, так как иначе при длинных кабелях получится слишком большое падение напряжений; в) в соответствии с этим повышаются и ежегодные расходы по ремонту и содержанию кабельной сети; г) повышаются потери энергии как в питательных, так и в отсасывающих кабелях.

В результате возрастают и капитальные затраты и текущие расходы.

Однако правильное решение вопроса выбора мощности будет то, которое даст минимум суммы всех капитальных затрат и текущих расходов.

Далее мы увидим, что важнейшие коэффициенты, необходимые для правильного выбора мощности являются в значительной мере функциями ряда местных условий. Мы попытаемся рассмотреть вопрос в общем виде и найти какое-то общее решение, которое должно оказаться наилучшим при средних условиях трамваев СССР в настоящий момент. Отдельные города, в которых те или иные факторы расчета существенно отклоняются от принятых средних, могут без труда в общие формулы поставить свои коэффициенты.

Согласно указанным выше принципиальным соображениям, мы должны математически выразить, насколько, с одной стороны, с возрастанием мощности каждой подстанции понижается стоимость подстанции и текущие расходы на каждый вагон в движении и насколько, с другой стороны, повышается стоимость кабельной сети постоянного тока и потери в ней.

Количество поездов, обращающихся в среднем в районе питания данной подстанции в час наибольшего движения, обозначим через n . Средняя потребляемая мощность в указанный период, при наличной нагрузке вагонов, скорости и режиме движения, пусть равна e kW на поезд. Тогда средняя отпускаемая подстанцией мощность в период максимального движения равна ne kW, а средний ток (при 600 V):

$$I_m = \frac{ne}{0,6}$$

Установленная мощность и стоимость подстанции, помимо ряда местных условий, определяются в основном величиной I_m , но далеко не пропорциональны ей, как указано выше. Исходя, ориентируясь на наличное оборудование, из серии подстанций со все возрастающей общей установленной мощностью. Считая в настоящее время совершенно доказанными преимущества ртутных выпрямителей, мы кладем в основу именно этот тип, согласно выпущенным ВЭО единицам: РВ-5 (500 А), РВ-10 (1 000 А), РВ-16 (1 600 А).

Мощность последнего типа принимаем в 1 600 А при 600 V, хотя первоначально этот тип проектировался на 2 000 А, а крупные трамваи, именуя его РВ-20, и рассчитывают его на 2 000 А.

Из этих выпрямителей мы можем по мощности комбинировать следующие группы: 1-РВ-5, 1-РВ-10, 1-РВ-16, 2-РВ-10, 2-РВ-16, 3-РВ-16, 4-РВ-16 и т. д.

Далее предполагаем, что каждая подстанция должна иметь резерв в виде одной машины (ниже мы вопрос разберем еще детальнее). Тогда получаем серию подстанций со следующими установленными единицами: 2-РВ-5, 2-РВ-10, 2-РВ-16, 3-РВ-16, 4-РВ-16, 5-РВ-16 и т. д.

Вариант 3-РВ-5 вместо 2-РВ-10 мы откидываем как очевидно неэкономный.

Вариант 3-РВ-10 по сравнению с 2-РВ-16 может иметь преимущество в тех случаях, когда нужно именно 2000 А и 1600 А недостаточны.

Очевидно, что для больших мощностей ток РВ-16 также недостаточен, и нужно было бы иметь машину, примерно, на 2500 ÷ 3000 А. Так например, вместо подстанции с 5-РВ-16 было бы выгоднее иметь 3-РВ-30. Это еще более содействовало бы удешевлению стоимости больших подстанций.

Однако за отсутствием этих типов в советском производстве исходим пока из принятой выше шкалы. Сообразно с этим будем применять указанные выпрямители для следующих расчетных мощностей¹.

2-РВ-5 . . .	300 ÷ 500 А	$I_{cp} = 300$ А
2-РВ-10 . . .	550 ÷ 1000 А	$I_{cp} = 800$ А
2-РВ-16 . . .	1100 ÷ 1600 А	$I_{cp} = 1350$ А
3-РВ-10 . . .	1700 ÷ 2000 А	$I_{cp} = 1850$ А
3-РВ-16 . . .	2100 ÷ 3200 А	$I_{cp} = 2700$ А
4-РВ-16 . . .	3400 ÷ 4800 А	$I_{cp} = 4100$ А
5-РВ-16 . . .	5000 ÷ 6400 А	$I_{cp} = 5700$ А

Показанные здесь нагрузки представляют собой расчетные нагрузки, по которым подсчитывается рабочая мощность машин. Они учитывают в час максимального движения не только среднюю величину тока, но и колебания тока, вызванные совпадением троганий с места, подъемов и т. д. Для больших подстанций с большим числом поездов разница между средней и расчетной нагрузкой невелика, но при малом числе поездов эта разница существенна. В статье автора по этому вопросу („Колебания нагрузки на трамвайных подстанциях“, Труды киевской комиссии Постоянного бюро всесоюзных трамвайных съездов, вып. 12) дано соотношение:

$$I_p = I_m \left[1 + \frac{(2 - \lg p) \cdot \sigma \cdot 1,27}{\sqrt{n-1}} \right],$$

где I_p — расчетный ток,

I_m — средний ток,

n — число поездов в час максимума,

σ — коэффициент, учитывающий неравномерность графика трамвайной нагрузки.

Если I_m — средний квадрат. ток одного поезда, i_m — средний арифметический ток поезда, то

$$\sigma = \sqrt{\frac{i_a^2}{i_m^2} - 1}.$$

Для средних трамвайных условий $\sigma = 0,6 - 1,0$, в среднем $\sigma = 0,8$.

p — процент случаев, превышающих расчетную мощность к общему времени работы. Принимая $p = 0,01\%$, мы для еще более редких случаев допускаем отключение машины автоматом.

Этот предел получается:

$$I_p = I_m \left[1 + \frac{(2 + 2) \cdot 0,8 \cdot 1,27}{\sqrt{n-1}} \right] = I_m \left[1 + \frac{4,05}{\sqrt{n-1}} \right].$$

Однако еще до достижения этого предела мы можем допустить перегрузку машины — по нормам на 100%. Принимаем для осторожности, что при этом пределе перегрузка равна только 67%.

Соответственно этому в среднем для советских трамваев с точки зрения кратковременных перегрузок:

$$I_o = 0,6 I_m \left[1 + \frac{4,05}{\sqrt{n-1}} \right].$$

Эта величина I_p , подсчитанная в расчете на обратные зажигания, будет больше I_m при $n \leq 40$.

При большем количестве поездов эта опасность уже отпадает, и можно принять $I_p = I_m$, так как даже перегрузка в 67% будет очень редкой ($p \approx 0,01\%$). Кроме того, принимаем среднюю нагрузку на поезд по данным Ленинграда, Москвы и других городов $g = 35$ А.

Окончательно получим следующую таблицу средних и расчетных мощностей в зависимости от числа поездов (табл. 1):

Таблица 1

Число поездов	I_m	I_p
5	175	310
10	350	490
20	700	810
30	1050	1110
40	1400	1400
50	1750	1750
100	3500	3500

На рис. 1 показана кривая $I_p = f(I_m)$.

Из этой кривой мы можем теперь для указанных выше комбинаций выпрямителей определить и возможные среднееиспользуемые нагрузки (табл. 2).

Таблица 2

Т	н	п	I_p в А	Среднееиспользуемая нагрузка А
2-РВ-5			200 — 330	270
2-РВ-10			400 — 920	660
2-РВ-16			1040 — 1600	1320
3-РВ-10			1700 — 2000	1850
3-РВ-16			2100 — 3200	2650
4-РВ-16			3400 — 4800	4100
5-РВ-16			5000 — 6400	5700

На рис. 2 показана зависимость установленной мощности (в амперах) от величин средней нагрузки в час максимума

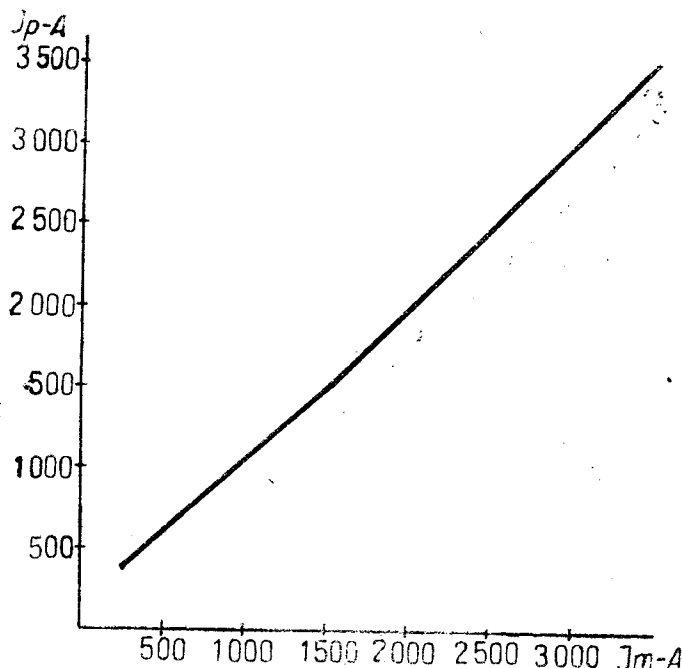


Рис. 1. Зависимость расчетного тока I_p от среднего рабочего тока I_m .

Мы видим, что установленная мощность возрастает далеко не пропорционально среднему току. Отношение среднееиспользуемой нагрузки в час максимума к установленной мощности получается (табл. 3):

При расценке каждой типовой подстанции необходимо учесть значение ряда местных условий: напряжение переменного тока, расстояния от подстанций на общей энергетической сети до тяговых подстанций, количество и характер отходящих фидеров постоянного тока, качество воды для

¹ Для токов < 300 А целесообразно применять стеклянные выпрямители.

Таблица 3

Т и п	I_m в А	Отношение к устано- вленной мощности
2-PB-5	270	0,27
2-PB-10	600	0,33
2-PB-16	1 320	0,41
3-PB-10	1 850	0,52
3-PB-16	2 650	0,55
4-PB-16	4 100	0,63
5-PB-16	5 700	0,71

охлаждения выпрямителей, необходимость в обслуживающих помещениях, материал для постройки здания и много других факторов. Все же мы попытаемся дать некоторые средние данные с той оговоркой общего характера, что полученные ниже коэффициенты и выводы должны быть модифицированы при изменении условий.

Стоимость подстанции мы разложим на отдельные слагаемые:

1. Выпрямители с относящимися к ним трансформаторами, реакторами, быстродействующими выключателями, масляниками, насосами и прочей аппаратурой;

2. Вводные кабели с вводными масляниками на тяговой подстанции, муфтами и прочей аппаратурой, а также с аппаратурой и масляниками на исходных точках кабелей;

3. Отходящие фидера постоянного тока с относящимися к ним автоматами и прочей аппаратурой;

4. Часть приборов и аппаратов, независимых от мощности подстанции (или мало зависящих): формовочный трансформатор, трансформатор собственных нужд, преобразователь постоянного тока для обслуживания реле, сигналов и дежурного освещения, шины постоянного тока, шины переменного тока и др.

5. Здание подстанции, стоимость которого зависит в значительной мере от выбранного расположения, от объема обслуживающих помещений и других факторов. Принципиально эта стоимость могла бы быть разбита на составные части, соответственно указанным выше 4 пунктам.

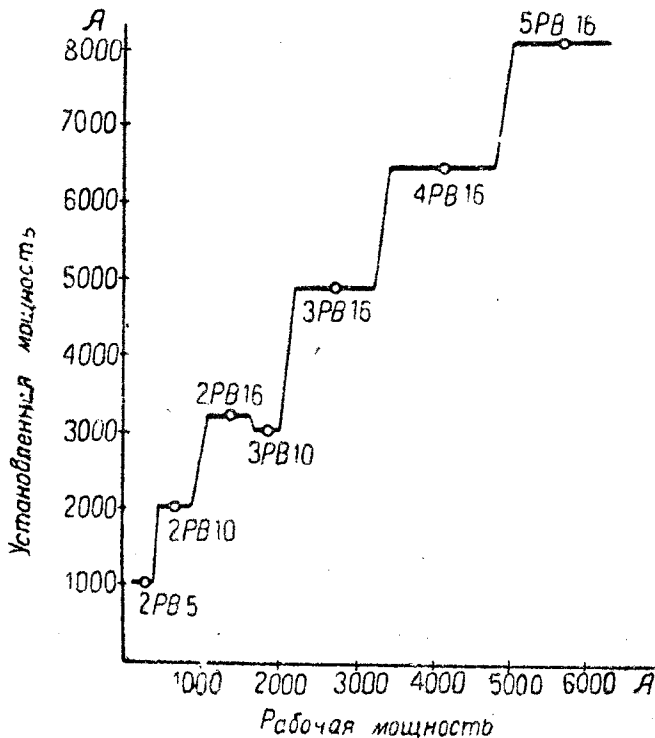


Рис. 2. Зависимость средней рабочей мощности от установленной мощности.

1. Стоимость выпрямителей и всех непосредственно связанных с ними приборов прямо пропорциональна количеству выпрямителей и составляет на один комплект (приблизительно с учетом монтажа и мелких материалов):

$$PB = 5 — 40\,000 \text{ руб.}$$

$$PB = 10 — 55\,000 \text{ „}$$

$$PB = 16 — 75\,000 \text{ „}$$

при этом регулировка напряжения предполагается только на +5% выводами, имеющимися на трансформаторе. При не-

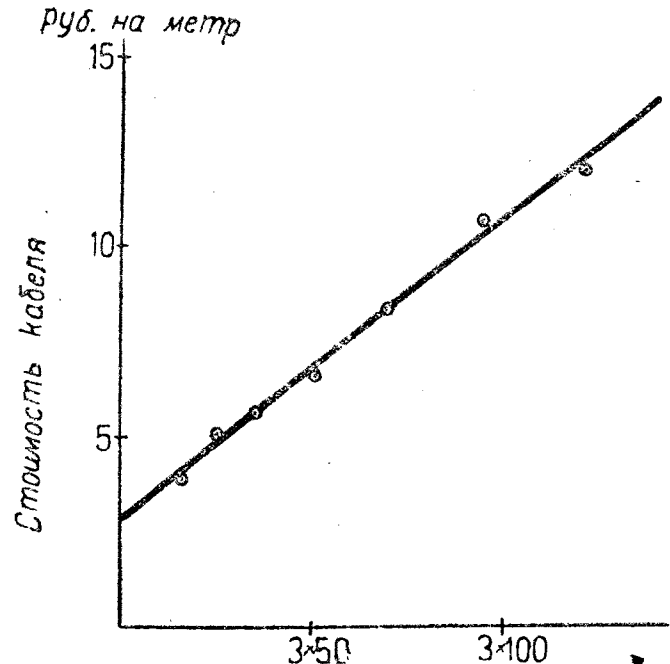


Рис. 3. Стоимость кабеля переменного тока в зависимости от сечения.

обходимости ставить потенциальные регуляторы или другие приборы стоимость на выпрямитель несколько повышается.

2. Стоимость кабелей высокого напряжения, вводов и выводов их, в сильной степени зависит от местных условий, как-то: напряжение, расстояние, реактанс сети, количество кабелей и т. д. Мы делаем такие предположения, которые в общем будут соответствовать средним городским условиям, но допускают и очень значительные отклонения: напряжение—6 600 В, средняя длина кабеля—1 500 м, масляники типа MB-22.

Количество кабелей мы принимаем во всех случаях 2, из коих один рабочий и другой резервный. Ниже мы рассмотрим, какие еще изменения получаются в наших выводах, если мы для варианта с большим числом малых подстанций будем допускать на ряде подстанций только один фидер. Три фидера иногда применяются на некоторых подстанциях для большей надежности, но этот расход вряд ли обоснован.

Сечение кабелей зависит от потребляемой мощности, т. е. для каждой из рассмотренных подстанций потребуется свое сечение. Поскольку падение напряжения при указанном расстоянии будет невелико, а допустимая нагрузка с точки зрения нагрева слишком велика, то необходимо определить сечение по экономическому расходу меди: чем больше сечение меди, тем больше стоимость кабеля, но тем меньше потери. В условиях капиталистического строя правильное решение дает известная формула Thomson. В условиях же социалистического общества понятия процентов на капитал и амортизацию приобретают совсем иной смысл, и формула Thomson должна быть видоизменена.

Стоимость кабеля возрастает не прямо пропорционально сечению. Если согласно имеющимся справочным ценам изобразить кривую стоимости кабеля как функцию от его сечения, согласно имеющемуся советскому стандарту для 6 600 В (3×25 , 3×35 , 3×50 , 3×70 и т. д.), то через полученные точки можно с небольшой погрешностью провести прямую, уравнение которой:

$$P_0 = A_0 + \alpha b = 2,80 + 0,08 q.$$

Постоянный член A_0 для высоковольтных кабелей довольно высок. Стоимость укладки кабеля для упрощения принимаем независимой от сечения, зато она будет сильно зависеть от местных условий: расстояния, провозов, наличия рабочей силы,

Детальный анализ ряда проектных смет по подстанциям разной мощности позволяет сделать следующие выводы по отдельным группам затрат:

а также от того, будем ли мы оба фидера вести параллельно или постараемся для большей надежности вести их разными трассами и возможно также от разных источников. На круг, как средние условия, принимаем 2 руб. 50 коп. за 1 м кабеля. В общем стоимость кабеля с укладкой на 1 м:

$$P = A + \alpha q = 5,30 + 0,08 q.$$

Потери энергии в кабеле определяются следующим образом. Если P_m — средняя мощность подстанции (в час максимума), то сила тока в одной из фаз равна:

$$i_m = \frac{P_m}{6600 \cdot \sqrt{3}}$$

Потери в час максимума равны (на 1 м и все 3 фазы):

$$\frac{3 i_m^2}{q \cdot 57} = \frac{i_m^2}{19 \cdot q}.$$

В капиталистическом обществе покупателю энергии нет дела до того, что происходит у продавца; он берет в расчет только покупную стоимость каждого киловатт-часа. В социалистическом же плановом хозяйстве мы должны проанализировать, какие хозяйственные изменения вызовет данное увеличение потерь на станции переменного тока, питающей данный трамвай. Эти хозяйственные изменения сводятся не только к увеличению текущих расходов, в первую очередь топлива, но и к увеличению установленной мощности на сумму потерь в час максимума. Таким образом, экономя на сечении кабелей, мы не только повышаем текущие расходы в народном хозяйстве, но и повышаем капитальные затраты на каждый дополнительный киловатт потерь. Кроме того, увеличенный расход топлива означает необходимость увеличения капитальных затрат на угольных копях, увеличение расхода смазки на электростанции вызывает известное увеличение капитальных затрат на нефтяных промыслах и нефтеперегонных заводах и т. д. Как видим, мы упираемся вообще в проблему недостаточности нашей системы учета стоимости, унаследованной от капиталистического строя. Этот общий вопрос мы здесь детально трактовать не будем. Мы должны по возможности выявить дополнительные капитальные затраты во всем народном хозяйстве на каждый киловатт потерь E и с другой стороны дополнительные текущие расходы на каждый киловатт-час η . И та и другая сторона сильно зависят от ряда местных условий; как средние цифры по СССР примем:

$$E = 500 \text{ руб. за 1 kW; } \eta = 0,03 \text{ руб. за 1 kWh.}$$

Количество потерь в год будет равно (если i сила тока в фазе):

$$S \frac{3i^2 dt}{q \cdot 57} = \frac{1}{19 \cdot q} S i dt.$$

Если обозначим среднее число часов работы максимум:

$$H = \frac{S i^2 dt}{i_m^2},$$

то сумма потерь в год на единицу длины кабеля будет:

$$\frac{i_m^2 \cdot H \cdot 10^{-8}}{19 \cdot q} \text{ kWh/m.}$$

Следовательно, дополнительные капитальные затраты во всем народном хозяйстве равны (на 1 м длины кабеля):

$$\frac{E \cdot i_m^2}{19 \cdot q} \cdot 10^{-8} \text{ руб. за 1 м,}$$

а дополнительные текущие расходы на год равны:

$$\frac{H \cdot i_m^2 \cdot \eta \cdot 10^{-8}}{19 \cdot q} \text{ руб.}$$

Для трамваев можно принять $H = 365$ и $14 \approx 5000$.

Таким образом суммарные капитальные затраты при сечении кабеля $3q$ будут на 1 м кабеля:

$$A + \alpha q + \frac{E \cdot i_m^2}{19 \cdot q} \cdot 10^{-8},$$

а суммарные текущие расходы:

$$\frac{H \cdot i_m^2 \cdot \eta \cdot 10^{-8}}{19 \cdot q} \text{ руб. в год.}$$

Чтобы найти народнохозяйственный оптимум, мы должны по-множить сумму капитальных затрат на известный процент и сло-

жить с текущими расходами. Но значение этого процента у нас иное, чем в капиталистическом обществе. Там процент на капитал, который в среднем берется банком, есть некоторая доля прибавочной стоимости, извлекаемой из рабочего класса капиталистами. У нас эта величина условная, отражающая ряд переходящих моментов, наличие у государства средств, среднюю эффективность капиталовложений в смысле понижения текущих расходов и себестоимости (по стране в целом), а также важность для государства данной затраты с точки зрения социально-политической. Имеет значение и возможность производства в данный момент необходимых материалов в СССР. Исходя из всего этого, мы для указанных здесь капитальных затрат должны применить высокий процент на капитал, который принимаем примерно 12%. Кроме того, необходимо прибавить известный процент на амортизацию капитала, принимаем 4%; итого $p = 16\%$. Следовательно, в общем виде необходимо, чтобы:

$$S = \left(A + \alpha q = \frac{E \cdot i_m^2 \cdot 10^{-8}}{19 \cdot q} \right) p + \frac{H \cdot i_m^2 \cdot \eta \cdot 10^{-8}}{19 \cdot q} = \min;$$

$$\frac{dS}{dq} = \alpha p - \frac{E \cdot i_m^2 \cdot 10^{-8} \cdot p}{19 \cdot q^2} - \frac{H \cdot i_m^2 \cdot \eta \cdot 10^{-8}}{19 \cdot q} = 0;$$

$$\alpha p \cdot 19 q^2 = i_m^2 \cdot 10^{-8} \cdot (E p + H \eta);$$

$$i_m = \frac{i_m}{q} = \sqrt{\frac{\alpha \cdot p \cdot 19000}{H \cdot \eta + E \cdot p}}.$$

По сравнению с формулой Thomson данная формула содержит в знаменателе под корнем еще слагаемое $E p$, отражающее увеличение капитальных затрат на станции. Зато стоимость электроэнергии η не равна полной покупной цене ее, а только действительным текущим расходам на киловатт-час. Для приведения выше конкретных значений:

$$\begin{aligned} \alpha &= 0,08, \\ H &= 5000, \\ p &= 0,16 \\ E &= 500 \\ \eta &= 0,3 \end{aligned}$$

имеем:

$$i_m = \frac{i_m}{q} = \sqrt{\frac{0,08 \cdot 0,16 \cdot 19000}{5000 \cdot 0,03 + 500 \cdot 0,16}} = 1,03 \approx 1,00.$$

Исходя из этой плотности тока в час максимума, мы определяем сечения кабелей переменного тока для указанных выше подстанций соответственно возможной средней рабочей мощности в час максимума (с учетом стандартных сечений кабелей) (табл. 4).

Таблица 4

Т и п	Мощность постоянного тока А	Мощность переменного тока А	Сечение кабелей 3q
2-РВ-5	330	17	3 × 25
2-РВ-10	760	40	3 × 50
2-РВ-16	1300	68	3 × 70
3-РВ-10	1750	92	3 × 95
3-РВ-16	2500	147	3 × 150
4-РВ-16	4250	224	3 × 240
5-РВ-16	5800	305	2 × 3 × 150

Соответственно этому, стоимость двух кабелей переменного тока получится для подстанций (при длине 1500 м):

2-РВ-5	22 000 руб.
2-РВ-10	28 000 .
2-РВ-16	32 000 .
3-РВ-10	40 000 .
3-РВ-16	52 000 .
4-РВ-16	67 000 .
5-РВ-16	78 000 . (2 рабочих, один резервный).

Стоимость аппаратуры на два ввода, с масляниками МВ-22, принимаем независимо от мощности подстанции 12000 руб. и столько же для вывода на питающей подстанции, итого 24000 руб.

При этом намечено наличие шин переменного тока, отдельных вводных масляников и отдельных трансформаторных. Однако для малых подстанций с двумя выпрямителями вполне возможно прикрепить каждый фидер к определенному транс-

форматору и обойтись одним масляником на ввод. Для малых подстанций возможно даже обойтись одним фидером, причем в случае выхода его из строя нагрузка передается на соседние подстанции. Эти возможности упрощения, благоприятствующие устройству большого числа малых подстанций, мы рассмотрим ниже.

3. Устройство шин постоянного и переменного тока, трансформатора собственных нужд, стеклянного выпрямителя с ба-

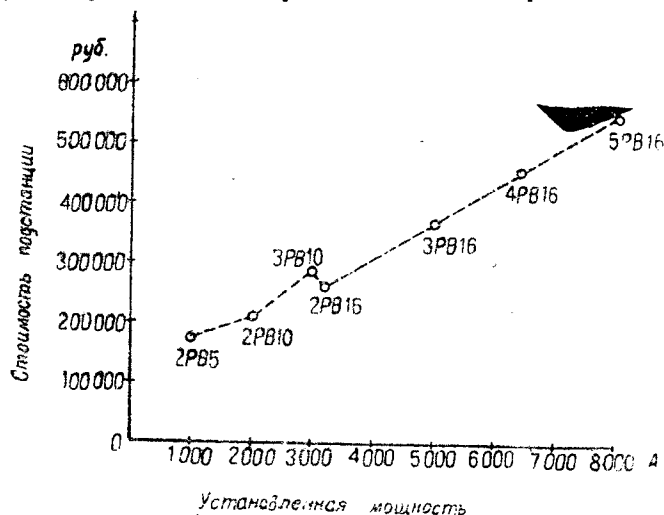


Рис. 4. Стоимость подстанции в зависимости от установленной мощности.

тареей, формовочного трансформатора и прочей общей аппаратуры можно оценить примерно в 20 000 руб. на большую подстанцию. При варианте с малыми подстанциями также можно сэкономить, в частности на формовочном трансформаторе и разной аппаратуре, о чем будет рассказано ниже.

4. Стоимость отходящих фидеров зависит от их количества и мощности, и почти не зависит от количества подстанций. Мы можем, независимо от расположения и количества подстанций, наметить участки питания, исходя из следующих соображений:

- 1) допустимое падение напряжения в рабочем проводе,
- 2) экономически целесообразные потери в проводе и
- 3) возможность обходных движений в случае повреждения провода, изоляции и т. д.

Мы также можем наметить отсасывающие точки, ориентируясь на радиус отсасывания, соответствующий среднегодовому падению в рельсах 2,5 В, а также подгоняя отсасывающие точки к питательным. Общая стоимость аппаратуры отходящих фидеров постоянного тока почти не зависит от количества и мощности подстанций и этот элемент можно не рассматривать.

5. Объем здания подстанций зависит и от мощности ее и от ряда специальных местных требований (одно- или двухэтажное здание, наличие и величина служебных помещений, мастерских и т. д., наличие двора, путей для ввода и вывода трансформаторов и т. д.).

На основании ряда вариантов принимаем для типов 2-PB-5, 2-PB-10, 2-PB-16 и 3-PB-10 — одноэтажные здания, для 3-PB-16, 4-PB-16 и 5-PB-16 — двухэтажные, причем при средних условиях получаем следующие кубатуры:

2-PB-5	800	1	1,33
2-PB-10	1 000	1	1,00
2-PB-16	1 200	1	0,75
3-PB-10	1 500	1	0,83
3-PB-16	2 200	1	0,75
4-PB-16	2 500	1	0,65
5-PB-16	2 800	1	0,60

Стоимость 1 м³ будет сильно зависеть от ряда местных условий. На круг принимаем для одноэтажных зданий — 30 руб. (довольно дорогое устройство для шин, масляников, кабелей и пр.), для двухэтажных — 20 руб. (материал — кирпич и железобетон). Итого получаем стоимость здания (округленно):

2-PB-5	24 000
2-PB-10	30 000
2-PB-16	36 000
3-PB-10	40 000
3-PB-16	45 000
4-PB-16	50 000
5-PB-16	55 000

В приведенных расчетах предположено, что городская вода вполне пригодна для выпрямителей. В случае необходимости построить циркуляционное устройство для выпрямителей, к постоянным капитальным затратам, почти независимым от мощности подстанции, необходимо прибавить значительную величину на циркуляционное устройство.

Сложив теперь всю стоимость подстанции (кроме отходящих фидеров), получим следующую табл. 5.

Таблица 5

Тип	Выпрямители и трансформаторы	Кабели высокого напряжения	Разная аппаратура	Общая стоимость	Здания	Всего	На установленный киловатт
2-PB-5	80 000	22 000	24 000	20 000	24 000	170 000	283
2-PB-10	110 000	21 000	24 000	20 000	30 000	212 000	177
2-PB-16	190 000	32 000	24 000	20 000	36 000	262 000	136
3-PB-10	165 000	40 000	24 000	20 000	40 000	289 000	160
3-PB-16	225 000	52 000	24 000	20 000	45 000	366 000	127
4-PB-16	300 000	67 000	24 000	20 000	50 000	461 000	120
5-PB-16	375 000	78 000	24 000	20 000	55 000	552 000	115

Стоимость подстанции (плюс кабели высокого напряжения, но без отходящих фидеров), как функция от установленной мощности в амперах, показана на рис. 4. Учтя еще среднюю рабочую мощность, исчисленную выше по каждому виду подстанций, получим следующую табл. 6.

Таблица 6

Тип	I_m в А	Стоимость подстанции
2-PB-5	270	170 000
2-PB-10	660	212 000
2-PB-16	1 320	262 000
3-PB-10	1 850	289 000
3-PB-16	2 150	366 000
4-PB-16	4 100	461 000
5-PB-16	5 700	552 000

Кривая стоимости, как функция от средней рабочей мощности (рис. 5), идет гораздо плавнее, чем кривая рис. 4, и имеет

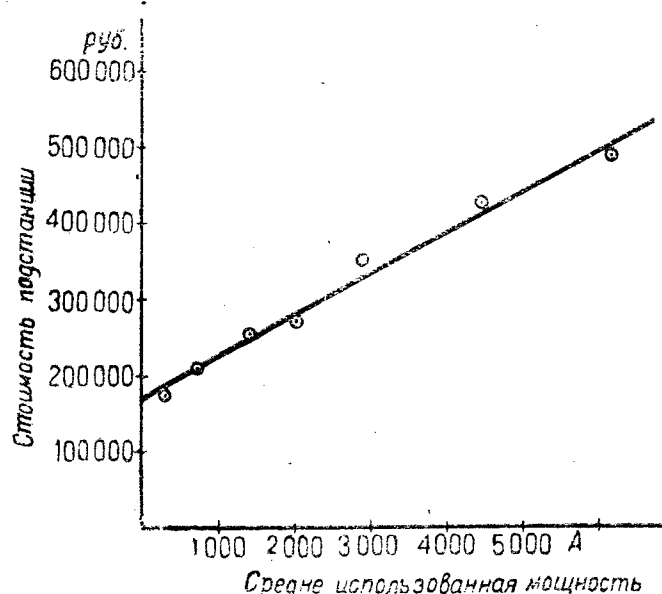


Рис. 5. Стоимость подстанции в зависимости от средней рабочей мощности

типичный вид кривой зависимости стоимости того или иного технического оборудования от его мощности. В большинстве случаев эту кривую заменяют прямой типа: $M + mI$.

Для данного случая можно считать стоимость подстанции:

$$S = 165 000 + 70 I$$

Таким образом мы выяснили первую составляющую наших итоговых расчетов.

Второй элемент, важный для решения вопроса— содержание персонала и ремонт оборудования подстанции. Зависимость этого элемента от ряда местных условий (зароботная плата, штат подстанции, стоимость материалов) совершенно очевидна.

Для средних советских условий принимаем дежурство на подстанции только 1 чел. средней квалификации. Фактически в настоящее время на большинстве советских подстанций дежурят по 2 чел., но такая система не рентабельна. Для выпрямительных подстанций второй дежурный не нужен. При 7-часовом рабочем дне требуется 5 чел. и, кроме того, один дворник, всего значит 6 работников (на немецких подстанциях штат состоит из 4-5 чел.). Соответственно этому годовая сумма заработной платы, включая 30% соцрасходов, дает: $880 \cdot 12 \cdot 130 = 13\,700$ руб.

При этом расчете мы не учитываем возможности устройства части подстанций, особенно малых подстанций, с автоматическим или же с централизованным управлением.

Мы не учитываем также возможности сокращения числа дежурств на малых подстанциях, с передачей их нагрузки в ночные и вечерние часы на соседние. Об этих возможностях, благоприятствующих постройке большого числа малых подстанций, мы будем говорить ниже.

Если сохранить существующую систему двух дежурных или даже иметь освобожденного от дежурства заведывающего подстанцией, то указанная выше цифра 13 700 руб. в год может возрасти примерно вдвое, что побудит к возможному сокращению числа подстанций.

Годовую сумму на ремонт и содержание зданий и оборудования подстанций мы можем исчислить, согласно данным опыта, в 1—2% их стоимости. Принимаем в среднем 1½%, что дает в год около $2\,500 + 1,1 i$ руб. на подстанцию, а вместе с содержанием персонала около $16\,000 + 1,1 i$ руб. в год $= N + n \cdot i$.

При наличии двух дежурных на подстанции расходы в год на одну подстанцию составят, примерно, $30\,000 + 1,1 i$ руб.

Для подстанций с вращающимися агрегатами при выборе мощности каждой подстанции необходимо учесть, что малые агрегаты с их худшим к. п. д. меньшим коэффициентом нагрузки дают значительно большие потери энергии. Для ртутных выпрямителей также имеется некоторая разница, зависящая от работы вспомогательных приборов, но она слишком мала, и мы можем ее не рассматривать.

Теперь мы перейдем к определению второй группы капитальных затрат и текущих расходов, связанных с кабельной сетью постоянного тока. Учет этих расходов должен влиять в сторону сокращения мощности подстанции, с целью сокращения потерь в кабелях и затрат на них.

Из общих выводов мы должны подсчитать стоимость кабельной сети и годовых расходов на нее в зависимости от мощности подстанции. Очевидно, что при одинаковой мощности подстанции стоимость кабельной сети будет зависеть от длин кабелей, т. е. от территории, охваченной данной подстанцией, количества путей на этой территории и т. д. Однако и при заданной общей величине территории и длине сети далеко не безразлично конкретная форма территории, расположение путей, расположение подстанции, трассы кабелей и т. д.

Даны: суммарный ток подстанции — I (А), площадь, занимаемая подстанцией — F (м²), длина путей по оси улиц — L (м). Отсюда определяем: линейную плотность тока (в среднем)

$$\gamma = \frac{I}{L} \text{ плотность сети (в среднем)} \quad l = \frac{L}{F}.$$

Для определения не конкретно числовой зависимости кабельной сети от мощности подстанции, а только характера этой зависимости, мы рисуем сперва площадь F в виде круга диаметром D , так что

$$\frac{\pi}{4} D^2 = F, \\ D = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot F}.$$

Предположим, что сеть имеет радиально-круговую форму с большим числом радиусов и кругов (рис. 6), причем плотность сети по всей площади круга одинакова. Рассмотрим отдельно питательные и отсасывающие кабели.

Нет надобности вести питательные кабели до самых границ территории подстанции, мы можем даже самые дальние кабели вести до известного расстояния от края территории, допуская известное падение напряжения в проводах. Величина этого расстояния определится как из соображений потери энергии, так и во избежание слишком большого понижения

скорости. Первое обстоятельство не зависит от длины кабелей, второе в известной мере зависит от длины кабелей, т. е. для ближних фидеров благодаря меньшему падению напряжений в кабелях можно допустить большое напряжение в проводах. Чтобы не усложнять расчетов, мы допускаем в проводах в среднем за часы максимума падение 10 V, что практически вполне приемлемо.

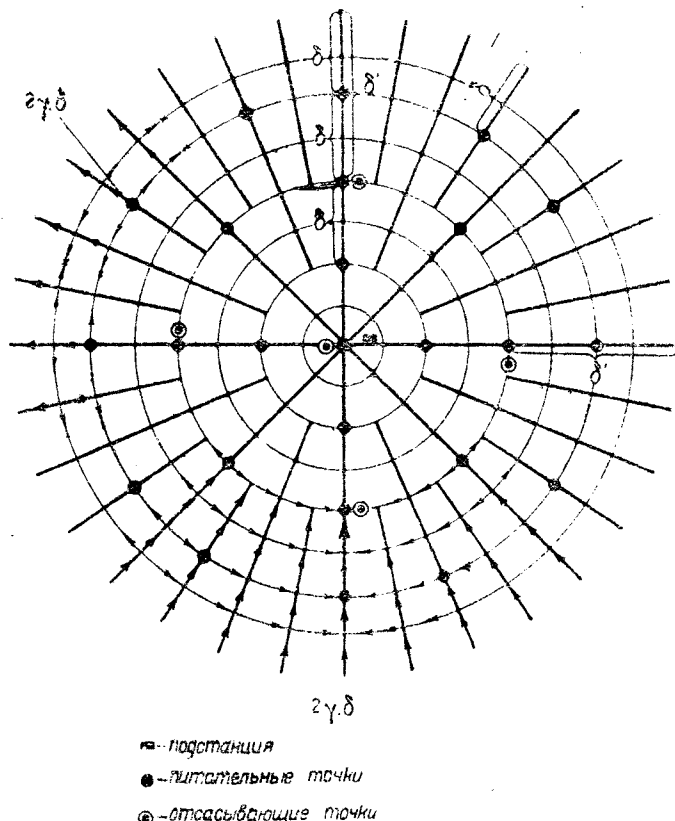


Рис. 6. Схема питания и отсасывания радиально-круговой сети

Если бы от питательного пункта до края территории подстанции шла только радиальная линия, то при плотности тока γ сила тока в начале линии была бы $\gamma \delta$ (δ — расстояние до края), и падение напряжения до края

$$\frac{1}{2} \cdot \gamma \delta \cdot \delta = \frac{\gamma \delta^2}{2},$$

где q' — сечение провода, $2q'$ — соответствует двухпутной линии. Благодаря круговым линиям, которые должны питаться от радиальной, сила тока на стволе, отходящем от питательного пункта, должна удвоиться ($2\gamma\delta$), и потому падение напряжения

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{2\gamma\delta}{57.2q'} = 10.$$

Для средних трамвайных условий $q' = 85 \text{ мм}^2$, откуда

$$\gamma \delta^2 = 2 \cdot 10 \cdot 85 \cdot 57 = 97\,000,$$

$$\delta = \sqrt{\frac{97\,000}{\gamma}} = \sqrt{\frac{97\,000 \cdot L}{I}}.$$

Таким образом наибольшая длина дальних кабелей будет:

$$\frac{D}{2} - \delta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{4F}{\pi}} - \sqrt{\frac{97\,000 \cdot L}{I}} = 0,56 \sqrt{F} - 310 \sqrt{\frac{L}{I}}.$$

Помимо этих наиболее дальних кабелей, мы будем иметь следующий круг более близких: длиной $\frac{D}{2} - 2\delta$, затем, быть может, $\frac{D}{2} - 3\delta$ и т. д. и, наконец, один кабель у самой подстанции длиной ноль. Дальних кабелей будет больше, чем близких, учитывая охват ими большей территории, примерно пропорционально длине каждой группы. Так например, если наружное кольцо кабелей имеет длины кабелей по 1 500 м, количеством 12, то второе кольцо имеет 8 кабелей длиной

1 000 м, третье кольцо — 4 по 500 м и один кабель у самой подстанции. Средняя длина кабелей при этих условиях получается, как нетрудно доказать, $\frac{2}{3}$ от длины наиболее дальних кабелей, т. е. средняя длина кабеля:

$$r = \frac{2}{3} \left(0,56 \sqrt{F} - 310 \sqrt{\frac{L}{I}} \right);$$

$$r' \approx 0,38 \sqrt{F} - 210 \sqrt{\frac{L}{I}}.$$

Для отсасывающих кабелей мы таким же путем должны отойти от края территории подстанции на величину δ' , допускаемую пределом падения напряжения, по нормам — 2,5 В (среднегодовое). Учитывая, что средняя длительность максимальных токов была нами принята около 14 часов в сутки, мы получим допустимое падение напряжения в часы максимума около $2,5 \cdot \frac{24}{14} = 4,25$ В. При плотности тока γ сила

тока, протекающая по радиусу извне от внешней части сети, будет $2\gamma\delta'$. Падение напряжения на 1 А/м двухколейного пути зависит от сечения рельс, их проводимости, качества стыков. С некоторым запасом принимаем как средние условия для трамваев СССР — $0,9 \cdot 10^{-5}$ В на 1 А/м (для рельс „Феникс“ около 0,7 — 0,75, для „Виполь“ 3 А около 1,00 — 1,05 В на 100 А/км). Таким образом для самых дальних кабелей падение напряжения от края территории до отсасывающих точек будет:

$$\frac{1}{2} \cdot 2\gamma\delta' \cdot 0,9 \cdot 10^{-5} = 4,25,$$

откуда

$$\delta' = \sqrt{\frac{\gamma\delta'^2 = 467\,000}{\gamma}} \approx 680 \sqrt{\frac{L}{F}}.$$

Это значит, что отсасывающие кабели могут располагаться значительно ближе, чем дальние питательные, примерно на конце второй от края группы кабелей ($\delta \approx 2\delta'$).

Таким образом самые дальние отсасывающие кабели имеют длину:

$$r' = \sqrt{\frac{4F}{\pi}} - \delta' = 0,56 \sqrt{F} - 680 \sqrt{\frac{L}{I}}.$$

Что касается более близких кабелей, то здесь имеется принципиальное различие между питательными и отсасывающими кабелями. При питательных кабелях мы каждым кольцом кабелей питаем кольцо от этих питательных точек до следующего большего кольца. При отсасывающих кабелях такой метод означал бы, что между внешним и внутренним кольцом отсасывающих точек имеется разница потенциала 2,5 В, т. е. от края территории имелось бы уже падение напряжения 5 В, что недопустимо. Поэтому внутреннее кольцо должно отойти от внешнего на расстояние $2\delta'$, чтобы получилось равномерное распределение токов. Обычно при этом внутреннее кольцо превращается в одну точку у самой подстанции, т. е. в один короткий фидер, отсасывающий ток небольшой территории. Поэтому можем считать, с известным упрощением, что средняя длина отсасывающего кабеля равна:

$$r' = 0,56 \sqrt{F} - 680 \sqrt{\frac{L}{I}}.$$

Как было сказано, эти рассуждения имеют целью выявить характер зависимости величин r и r' от F , L и I . Практически мы будем иметь значительные отклонения этих величин, и в первую очередь в сторону увеличения. Форма сети неправильная, расположение подстанции не в центре района, а ближе к какому-либо краю, продолговатая форма территории подстанции, трассировка кабелей не по кратчайшему пути, а в зависимости от имеющихся удобных проездов — все это вызывает весьма значительное удлинение кабелей. Чтобы проверить, насколько это удлинение имеет место в практике, используем материал детальных расчетов, произведенных в известном плане развития для 9 подстанций ленинградского трамвая. Для каждой из этих подстанций на основании указанных расчетов определены: F , L , I , далее, средняя длина питательного кабеля — r_m и средняя длина отсасывающего r'_m . Допускаем, что в формулах для r_m и r'_m коэффициенты при $\sqrt{\frac{L}{I}}$ остаются так, как они были подсчитаны для круговой

формы территории, но коэффициенты C и C' при $\sqrt{F}$ будут значительно больше, чем теоретически. Поэтому мы обратим по имеющимся величинам r_m и r'_m подсчитываем коэффициенты C и C' всех 9 подстанций и сравниваем с теоретическими величинами 0,38 и 0,56. Результат дан в нижеследующей табл. 7

(Низкий коэффициент C для питательных кабелей подстанции Ленина и Лермонтова объясняется тем, что на них имеются дальше фидера с усиливающими проводами вдоль линии, не учтенными в длинах кабелей).

Таким образом коэффициент C при $\sqrt{F}$ для питательных кабелей получился равным 0,59 вместо 0,38, а коэффициент C' для отсасывающих кабелей получился равным 0,83 вместо 0,56. В итоге получаем для длин кабелей практически приемлемые формулы:

$$r = 0,59 \sqrt{F} - 210 \sqrt{\frac{L}{I}} \text{ — для питательных,}$$

$$r' = 0,83 \sqrt{F} - 680 \sqrt{\frac{L}{I}} \text{ — для отсасывающих.}$$

Длина отсасывающих кабелей превращается в нуль, если

$$0,83 \sqrt{F} \leq 680 \sqrt{\frac{L}{I}},$$

или

$$F \cdot I \leq L \left(\frac{680}{0,83} \right)^2 \leq 670\,000 \text{ L,}$$

или

$$I \geq 670\,000 \cdot \frac{L}{F} \leq 670\,000 \text{ L.}$$

Если, например, $l = 0,002$ (сеть средней густоты), то $I \geq 1\,340$ А, при меньшем токе нет надобности в специальных отсасывающих кабелях.

Для питательных кабелей предел значительно ниже и определяется из условия:

$$0,59 \sqrt{F} = 210 \cdot \sqrt{\frac{L}{I}},$$

$$F \cdot I = \left(\frac{210}{0,59} \right)^2 \cdot L = 130\,000 \text{ L,}$$

$$I = 130\,000 \text{ L.}$$

Таблица 7

Подстанция	I	L	F · 10 ³	Питательные кабели			Отсасывающие кабели				
				r_m	$210 \sqrt{\frac{L}{I}}$	$r_m + 210 \sqrt{\frac{L}{I}}$	C	r'_m	$680 \sqrt{\frac{L}{I}}$	$r'_m + 680 \sqrt{\frac{L}{I}}$	C'
25 Октября	4 480	14 500	6 500	1 130	380	1 510	0,60	800	1 250	2 050	0,80
Лассаля	5 360	11 000	5 500	1 120	300	1 420	0,61	900	1 000	1 900	0,81
Володарского	4 660	21 000	19 000	2 310	450	2 760	0,63	2 400	1 480	8 880	0,89
Урицкого	2 660	16 000	10 000	1 300	510	1 810	0,57	980	1 700	2 680	0,85
Коминтерна	2 680	18 000	11 500	1 620	550	2 170	0,64	1 480	1 800	2 280	0,96
Ленина	1 860	18 000	23 000	1 120	780	1 900	0,40	1 260	1 530	8 760	0,78
Красных Зорь	4 460	27 000	20 000	1 920	510	2 430	0,54	1 680	1 700	3 380	0,76
Пролетарская диктатура	1 940	10 500	8 000	1 060	470	1 530	0,54	660	1 620	2 280	0,75
Лермонтова	4 980	27 000	22 000	1 600	490	2 090	0,43	2 080	1 620	3 700	0,80

В среднем

0,59

0,83

При $l = 0,002$, $I = 260$ А, питательная сеть хотя бы и небольшая требуется даже для довольно малых подстанций, вплоть до $I = 260$ А (при $l = 0,002$).

Это значит, что для токов ниже 260 А у нас нет никакого стимула в сторону дальнейшего сокращения мощности подстанции, ибо кабельной сети все равно нет. Но и для токов выше 260 А, но ниже 1300 А стимул в сторону снижения мощности каждой подстанции меньше, чем в области больших токов, так как в этом случае мы выгадываем только на питательных фидерах, отсасывающая же сеть все равно отпадает.

Как видно из табл. 7, коэффициенты C и C' для отдельных подстанций имеют отклонения против средней величины до 10—12%. С этой точностью и следует принять выведенные формулы. Однако, когда речь идет о большой сети, разбитой на ряд отдельных подстанций, то в сумме отклонения отдельных подстанций должны сгладиться, и приведенные формулы должны иметь значительно меньшую погрешность. Будет весьма интересно, если на подсчетах других трамваев будут проверены вышеуказанные формулы. Было бы интересно также проверить, в какой мере соответствует истине сделанное допущение, где коэффициент при $\sqrt{\frac{L}{I}}$ можно принять

равным теоретическому (при круговой системе). Имевшийся материал 9 подстанций не позволял по своей точности делать таких проверок. Если принять этот коэффициент, скажем, меньше теоретического, то при обработке опытных материалов мы получили бы меньшие коэффициенты C и C' (при $\sqrt{F}$), так что результат был бы примерно тот же. Разница может быть при переходе к режиму с более крупными или более мелкими подстанциями.

Для определения стоимости кабельной сети мы должны, кроме длин кабелей, знать и сечение их, которое зависит от мощности подстанции.

Если j —средняя плотность тока, то общее сечение всех кабелей как питательных, так и отсасывающих, должно быть $Q = \frac{I}{j}$.

Экономически выгодная плотность тока для кабелей постоянного тока определяется тем же методом, что для переменного. Строим по справочнику кривую стоимости кабеля, как функция сечения q (рис. 7), которая довольно хорошо заменяется прямой

$$K + kq = 120 + 0,022 q \text{ (на метр)}.$$

Потеря энергии в кабеле постоянного тока, равная 1 м длины его $\frac{I^2 q^{-3}}{57 \cdot q}$ в часы максимума, вызывает:

1) Добавочную затрату капитала во всей цепи народного хозяйства. Величина этого капитала на киловатт— E' будет больше, чем для кабелей переменного тока, во-первых, с учетом потерь в подстанции, во-вторых, с учетом увеличения стоимости самого оборудования подстанции. Поэтому, если E принято выше 500 руб. на 1 kW, то $E' \approx 700$ руб. на 1 kW.

2) Текущие расходы на киловатт-час потерь принимаем по тем же причинам больше, чем для кабелей переменного тока (η), а именно: $\eta' = 0,04$ руб. на 1 kW.

Народнохозяйственный оптимум получается, когда

$$\frac{q' \cdot I^2 \cdot 10^{-3} \cdot H}{57 q} + \frac{E' \cdot I^2 \cdot 10^{-3}}{57 \cdot q} p + K + kq = \min,$$

или

$$kp = \frac{(\eta' H + E' p) I^2 \cdot 10^{-3}}{57 \cdot q^2};$$

$$i = \frac{i}{q} = \sqrt{\frac{57 \cdot 000 \cdot k \cdot p}{\eta' H + E' \cdot p}}.$$

Принимая $k = 0,022$, $p = 0,16$, $\eta' = 0,04$, $H = 5000$, $E' = 700$, получаем

$$i = 0,8.$$

Что плотность тока в кабелях постоянного тока должна быть меньше, чем для кабелей переменного тока, ясно из приведенных соображений. Некоторые питательные кабели, наиболее дальние, должны будут получить еще большее сечение, исходя из допустимого падения напряжения.

Если мы допустим в среднем в час максимума 25 В в питаемом кабеле, то это означает, что:

$$\frac{l \cdot i}{57 \cdot b} \leq 25.$$

$$\text{При } j = \frac{i}{q} = 0,8, l \leq 25 \cdot 57 \cdot 1,25 \leq 1800 \text{ м.}$$

При более длинных кабелях плотность тока будет обратно пропорциональна длине. Это будет иметь место при радиально-круповой сети путей, если

$$\frac{D}{2} - 310 \cdot \sqrt{\frac{L}{I}} \geq 1800.$$

Принимая

$$\gamma = \frac{I}{L} = 0,25,$$

имеем

$$\frac{D}{2} = 2420, D = 4840, F = 18000000 \text{ м}^2 = 18 \text{ км}^2.$$

В действительности мы будем иметь такие случаи и при меньших территориях подстанций.

На отсасывающих кабелях при неодинаковой длине плотность тока примерно обратно пропорциональна длине, а для близких кабелей она становится недопустимой ввиду нагрева, так что приходится включать реостат и делать кабель толще,

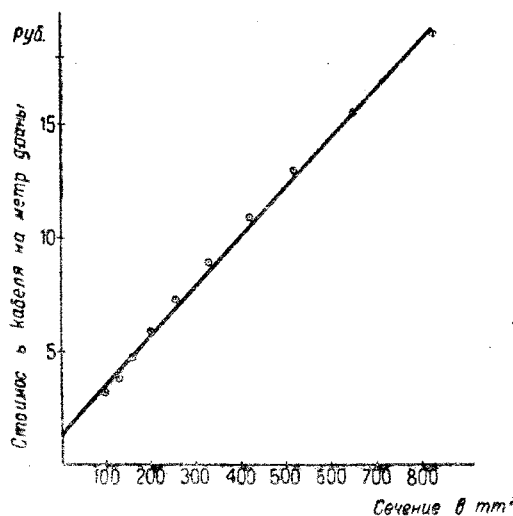


Рис. 7. Стоимость кабеля постоянного тока в зависимости от его сечения

чем по расчету. В результате общее сечение отсасывающих кабелей обычно несколько больше, чем по указанной формуле.

В среднем, мы можем как для питательных, так и для отсасывающих кабелей сделать надбавку к теоретическому общему сечению ($Q = 1,25 I$) в размере примерно 8%, или $Q = 1,35 I$ и соответственно средняя плотность тока $j = 0,74$.

Сумма потерь в питательных кабелях будет:

$$\frac{I^2}{57 \cdot Q} \left(0,59 \sqrt{F} - 210 \sqrt{\frac{L}{I}} \right) \cdot 10^{-3} \text{ kW.}$$

а в отсасывающих

$$\frac{I^2}{57 \cdot Q} \left(0,83 \sqrt{F} - 680 \sqrt{\frac{L}{I}} \right) \cdot 10^{-3} \text{ kW,}$$

в сумме

$$\frac{I^2}{57 \cdot Q} \left(1,42 \sqrt{F} - 890 \sqrt{\frac{L}{I}} \right) \cdot 10^{-3} \text{ kW} = \\ = \frac{I \cdot 10^{-3}}{57 \cdot 1,35} \left(1,42 \sqrt{F} - 890 \sqrt{\frac{L}{I}} \right).$$

Это вызовет:

1) увеличение капитальных затрат на сумму (по 700 руб. на 1 kW):

$$\frac{700 \cdot I \cdot 10^{-3}}{57 \cdot 1,35} \left(1,42 \sqrt{F} - 890 \sqrt{\frac{L}{I}} \right),$$

2) годовые потери энергии на сумму (5000 час. в год):

$$\frac{5000 \cdot 0,04 \cdot I \cdot 10^{-3}}{57 \cdot 1,35} \left(1,42 \sqrt{F} - 890 \sqrt{\frac{L}{I}} \right).$$

С другой стороны, стоимость самих кабелей определяется их общим сечением и количеством. Стоимость каждого кабеля в среднем равна $(K + kq)$ руб. на 1 м, при n кабелях сумма равна $n(K + kq) = nK + K \cdot Q$.

Ориентируясь в среднем на сечения от 240 до 800 мм², имеем согласно справочным ценам (табл. 8):

Таблица 8

Сечение мм ²	Стоимость на 1 м	Стоимость на 1 м и 1 мм ²
240	6,77	2,82 коп.
310	8,36	2,70 "
400	10,24	2,56 "
500	12,22	2,44 "
625	14,28	2,40 "
800	18,44	2,31 "

Принимаем как среднюю величину 2,5 коп. на 1 мм² 1 м длины. Следовательно, общая стоимость всех питающих кабелей составит:

$$0,025 \cdot 1,35 \left(0,59 \sqrt{F} - 210 \sqrt{\frac{L}{I}} \right),$$

а отсасывающих

$$0,025 \cdot 1,35 \left(0,83 \sqrt{F} - 680 \sqrt{\frac{L}{I}} \right),$$

всего же стоимость кабелей определится:

$$0,025 \cdot 1,35 \left(1,42 \sqrt{F} - 890 \sqrt{\frac{L}{I}} \right).$$

К этому нужно прибавить стоимость укладки по 2½ руб. на 1 м, что дает при среднем сечении $q = 500$ мм² приблизительно 0,5 коп. на метр и квадратный миллиметр, так что общая стоимость кабелей с укладкой получается:

$$0,03 \cdot 1,35 \left(1,42 \sqrt{F} - 890 \sqrt{\frac{L}{I}} \right).$$

Теперь мы можем подвести итог капитальных затрат на подстанцию:

$$165\,000 + 70 \cdot I + \left(\frac{700 \cdot I \cdot 10^{-3}}{57 \cdot 1,35} + 0,03 \cdot 1,35 \cdot I \right) \left(1,42 \sqrt{F} - 890 \sqrt{\frac{L}{I}} \right).$$

Годовые же расходы равны:

$$16\,000 + 1,1 I + \frac{5\,000 \cdot 0,04}{57 \cdot 1,35} 10^{-3} I \cdot \left(1,42 \sqrt{F} - 890 \sqrt{\frac{L}{I}} \right).$$

В текущие расходы по кабельной сети надо включить содержание и текущий ремонт последней. Для упрощения расчетов принимаем, что этот небольшой расход, составляющий небольшой процент от стоимости кабельной сети, включен в цифру амортизации, т. е. в общую сумму 16% от основного капитала. Народно-хозяйственный оптимум получится, когда сумма текущих расходов плюс 16% от капитальных затрат, деленная на число ампер I , даст минимум.

Это дает:

$$S = \frac{26\,000}{I} + 11,2 + \frac{16\,000}{I} + 1,1 + \left(1,42 \sqrt{F} - 890 \sqrt{\frac{L}{I}} \right) \left[\frac{700 \cdot 10^{-3} \cdot 0,16 + 5\,000 \cdot 0,04 \cdot 10^{-3}}{57 \cdot 1,35} + 0,03 \cdot 1,35 \cdot 0,16 \right] = \min.$$

Применяя приведенные выше обозначения, пишем:

$$F = \frac{I}{\gamma \cdot l}; \quad \frac{L}{I} = \frac{1}{\gamma}; \quad 1,42 \sqrt{F} - 890 \sqrt{\frac{L}{I}} = 1,42 \frac{\sqrt{I}}{\sqrt{\gamma \cdot l}} - \frac{890}{\sqrt{\gamma}},$$

так что

$$S = \frac{42\,000}{I} + 12,3 + \left(\frac{1,42 \sqrt{I}}{\sqrt{\gamma \cdot l}} - \frac{890}{\sqrt{\gamma}} \right)$$

$$\left[\frac{700 \cdot 10^{-3} \cdot 0,16 + 5\,000 \cdot 0,04 \cdot 10^{-3}}{57 \cdot 1,35} + 0,03 \cdot 1,35 \cdot 0,16 \right] = \min,$$

$$\frac{dS}{dI} = -\frac{42\,000}{I^2} + \frac{1,42}{2\sqrt{I}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\gamma \cdot l}} \cdot 10,53 \cdot 10^{-3} = 0;$$

$$I \sqrt{I} = \frac{42\,000 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \sqrt{\gamma \cdot l}}{1,42 \cdot 10,53},$$

откуда

$$I_0 = 32\,000 \cdot \sqrt[3]{\gamma \cdot l}.$$

Это и есть оптимальная мощность подстанции. Так например, для средних городских условий $l = 0,002$ м на 1 мм²:

$$\gamma = 0,25 \text{ А на } 1 \text{ мм}^2,$$

откуда

$$I_0 = 32\,000 \cdot \sqrt[3]{0,002 \cdot 0,25} = 2\,600 \text{ А}.$$

Для очень слабо обслуживаемых окраин часто имеем примерно

$$\gamma = 0,05, \quad l = 0,0005,$$

тогда

$$I_0 = 32\,000 \cdot \sqrt[3]{0,05 \cdot 0,0005} \approx 950.$$

Надо проверить, в какой мере соблюдается вышеуказанное условие $I \geq 670\,000$. При $l = 0,0005$ м этому соответствует $I \geq 335$ А. Это значит, что и для далеких окраин невыгодно доходить до таких малых подстанций, чтобы можно было обойтись без отсасывающих кабелей, а тем более без питающих.

Для наиболее густо обслуживаемых районов крупных городов часто доходим до $\gamma = 0,50$, $l = 0,004$, так что

$$I_0 = 32\,000 \cdot \sqrt[3]{0,50 \cdot 0,004} \approx 4\,000.$$

Нижнему пределу ($I_0 \approx 950$) соответствует подстанция 2-РВ-10, верхнему ($I_0 = 4\,000$)—4-РВ-16. Более мощные единицы становятся нецелесообразными даже в самых густых районах города, более мелкие (2-РВ-5) даже на окраинах нерентабельны.

По этому же методу можем ориентировочно наметить оптимальное число подстанций при постройке нового трамвая или расширении существующего. Пусть, например, для Москвы 1933 г., по одному из вариантов плана, при 1500 поездках в движении потребная мощность в часы максимума $1\,500 \cdot 45 = 68\,000$ А, площадь же, охваченная всеми подстанциями вместе, равна к этому времени (по краю трамвайных линий) $200\,000\,000$ м². Тогда $\gamma l = 68\,000 : 20\,000\,000 = 0,0034$, и оптимальная мощность одной подстанции:

$$I_0 = 32\,000 \cdot \sqrt[3]{0,0034} = 2\,250.$$

Количество подстанций будет $68\,000 : 2\,250 = 30$.

Если принять систему двух дежурных на одной подстанции, то расходы по содержанию каждой подстанции в приведенных расходах следует принять $30\,000 + 11 \cdot l$, вместо $16\,000 + 1,1 l$, в результате чего оптимальная мощность одной подстанции должна повыситься, как нетрудно подсчитать, до

$$I_0 = 38\,000 \sqrt[3]{\gamma \cdot l}.$$

В приведенном примере Москвы 1933 г. мы для этой предпосылки получим $I_0 = 2\,660$, и всего чисто подстанций—25.

Необходимо подчеркнуть, что расчеты, касавшиеся длин кабелей, относятся только к развитой и сложной форме сети, при которой каждая подстанция обслуживает ряд пересекающих путей, заполняющих известную территорию. Если же отдельные подстанции обслуживают только определенные вылетные линии, то к ним настоящая теория не относится. Для них при заданной мощности подстанции длины кабелей будут выше, и потому мы будем иметь для этого случая в качестве оптимума более мелкие подстанции.

Мы можем выразить приведенный расчет оптимальной мощности подстанции и в более общем виде, с применением алгебраических знаков для факторов экономического и технического характера. Тогда получаем:

1) капитальные затраты:

$$S = M + mI + \left(1,42 \sqrt{F} - 890 \sqrt{\frac{L}{I}}\right) \left(\frac{E' \cdot I \cdot 10^{-3} \cdot j}{57 \cdot 1,08} + k' \cdot 1,08 \cdot \frac{I}{j}\right),$$

где k' —средняя стоимость кабеля постоянного тока с укладкой на 1 м и 1 мм² (0,03 руб.);

2) текущие расходы:

$$N + nI + \frac{H \cdot \eta' \cdot 10^{-3} \cdot I \cdot j}{57 \cdot 1,08} \left(1,42 \sqrt{F} - 890 \sqrt{\frac{L}{I}}\right).$$

Можно подсчитать отдельно минимум капитальных затрат на 1 А.

$$s = \frac{S}{I} = \frac{M}{I} + m + \left(\frac{1,42 \sqrt{I}}{\sqrt{\gamma l}} - \frac{890}{\sqrt{\gamma l}}\right) \left(\frac{E' \cdot j \cdot 10^{-3}}{57 \cdot 1,08} + \frac{k'}{j} \cdot 1,08\right) = \min,$$

$$\frac{ds}{dI} = -\frac{M}{I^2} + \frac{1,42}{2 \sqrt{\gamma l} \cdot \sqrt{I}} \left(\frac{E' \cdot j \cdot 10^{-3}}{57 \cdot 1,08} + \frac{k'}{j} \cdot 1,08\right) = 0,$$

$$I \sqrt{I} = \frac{2 M \cdot \sqrt{\gamma l} \cdot 57 \cdot 1,08 \cdot j}{1,42 (E' \cdot j^2 \cdot 10^{-3} + k' \cdot 1,08^2 \cdot 57)},$$

$$I_0' = \sqrt[3]{\frac{4 M^2 \cdot \gamma l \cdot 57^2 \cdot 1,08^2 \cdot j^2}{1,42^2 \cdot (E' \cdot j^2 \cdot 10^{-3} + k' \cdot 1,08^2 \cdot 57)^2}} \cdot \sqrt[3]{\gamma l}.$$

Так, если

$$M = 165\,000, j = 0,8, E' = 700, k' = 0,03,$$

то

$$I_0' = 28\,000 \sqrt[3]{\gamma l}.$$

Если при тех же условиях $j = 1,0$,

то

$$I_0' = 30\,500 \sqrt[3]{\gamma l}.$$

Если при тех же условиях $j = 1,5$,

то

$$I_0' = 33\,000 \sqrt[3]{\gamma l}.$$

Если, с другой стороны, рассмотрим отдельно текущие расходы, то минимум их получится при

$$\frac{N}{I^2} = \frac{H \cdot \eta' \cdot 10^{-3} \cdot j}{57 \cdot 1,08} \cdot \frac{1,42}{\sqrt{\gamma l} \cdot 2 \sqrt{I}},$$

откуда

$$I_0'' = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot N^2 \cdot 57^2 \cdot 1,08^2}{1,42^2 \cdot H^2 \cdot \eta'^2 \cdot j^2 \cdot 10^{-6}}} \cdot \sqrt[3]{\gamma l}.$$

Так, для

$$N = 16\,000, H = 5\,000, \eta' = 0,04, j = 0,8,$$

получаем

$$I_0'' = 42\,000 \sqrt[3]{\gamma l}.$$

Если при тех же условиях $j = 1,0$,

то

$$I_0'' = 36\,500 \sqrt[3]{\gamma l},$$

при

$$j = 1,5, I_0'' = 27\,500 \sqrt[3]{\gamma l}.$$

При наличии двух дежурных на подстанции принимаем:

$$N = 30\,000, H = 5\,000, \eta' = 0,04, j = 0,8$$

и тогда

$$I_0'' = 65\,000 \sqrt[3]{\gamma l}.$$

Мы видим, что в общем текущие расходы, особенно при необходимости иметь по два дежурных на подстанции, требуют существенно более мощных подстанций, чем капитальные затраты.

Для народнохозяйственного оптимума необходимо, чтобы получился минимум для суммы текущих расходов плюс процент p от капитальных затрат, в расчете на единицу мощности, т. е.

$$\frac{(N + nI) + p(M + mI)}{I} + \left(1,42 \sqrt{F} - 890 \sqrt{\frac{L}{I}}\right)$$

$$\left[\frac{E' \cdot j \cdot p + H \cdot \eta' \cdot j \cdot 10^{-3} + k' \cdot 1,08 \cdot p}{57 \cdot 1,08} + \frac{p}{j}\right] = \min,$$

или

$$\frac{N + pM}{I^2} = \frac{1,42}{2 \sqrt{I} \cdot \sqrt{\gamma l}}$$

$$\left[\frac{j^2 \cdot (E'p + H \cdot \eta') \cdot 10^{-3} + k'p \cdot 1,08^2 \cdot 57}{57 \cdot 1,08 \cdot j}\right],$$

$$I_0 = \sqrt[3]{\frac{(N + pM)^2 \cdot 4 \cdot 57^2 \cdot 1,08^2 \cdot j^2}{1,42^2 \cdot [j^2 \cdot 10^{-3} (E'p + H \cdot \eta') + pk' \cdot 1,08^2 \cdot 57]^2}} \cdot \sqrt[3]{\gamma l}.$$

В частности, для

$$N = 16\,000, M = 165\,000, p = 0,16, E' = 700, H = 5\,000$$

$$\eta' = 0,04, k' = 0,03, j = 0,8,$$

имеем

$$I_0 = 32\,000 \sqrt[3]{\gamma l},$$

а при тех же условиях, если

$$N = 30\,000, I_0 = 38\,000 \sqrt[3]{\gamma l},$$

как было подсчитано выше.

Характерно, что в итоговой формуле отсутствует величина L (длина сети), имеющийся фактор γl можно написать прямо в виде:

$$\gamma l = \frac{I}{L} \cdot \frac{L}{F} = \frac{I}{F}.$$

Однако это имеет место только до определенного предела, при котором $I > 670\,000$ л.

Это будет иметь место, когда

$$32\,000 \sqrt[3]{\gamma l} \leq 670\,000 \text{ л},$$

или

$$\gamma l \leq 10\,000 \text{ л}^3,$$

или

$$\gamma \leq 10\,000 \cdot \text{л}^2,$$

т. е. при сравнительно густой сети и небольшом движении. Практически это бывает очень редко, так как обычно в районах густой сети мы имеем одновременно и густое движение. В частности, при

$$l = 0,0005 \text{ эта формула дает } \gamma \leq 0,003$$

$$l = 0,001 \text{ " " " } \gamma \leq 0,011$$

$$l = 0,002 \text{ " " " } \gamma \leq 0,044$$

$$l = 0,003 \text{ " " " } \gamma \leq 0,100,$$

что редко попадает в практику. Это значит, что невыгодно доводить мощность подстанций до таких малых размеров, при которых вовсе отпадает надобность в отсасывающей сети, а тем более в питательной.

Подсчитанная выше формула, как мы видели, позволяет найти для целого города ориентировочно оптимальное число подстанций. Но она позволяет также грубо проверить, насколько целесообразно подобраны мощности подстанций в каждом районе, в зависимости от γl , а также мощность каждой отдельной подстанции. Если I —рабочая сила тока в час максимума, F —территория подстанции, то согласно данной формуле:

$$I = 32\,000 \sqrt[3]{\frac{I}{F}}, \text{ л}^3 = 32 \cdot 10^{12} \cdot \frac{I}{F};$$

$$\text{л}^2 \cdot F = 32 \cdot 10^{12}, F = \frac{32 \cdot 10^{12}}{\text{л}^2}, I = \frac{5,5 \cdot 10^6}{\sqrt{F}}.$$

Если при данной территории подстанции F (скажем $10\,000\,000\text{ м}^2$), мы допустим вместо

$$I = \frac{5\,500\,000}{\sqrt{10\,000\,000}} \approx 1\,750\text{ А}$$

подстанцию с мощностью 4-РВ-16, т. е. рабочей мощностью $3\,400 + 800\text{ А}$, то становится ясным, что данную подстанцию надо дробить на две или даже на три.

Во всех предыдущих рассуждениях мы исходили из равенства всех подстанций в смысле резерва и дежурств. Мы предполагали, что каждая подстанция должна быть снабжена и резервным фидером, и одной резервной машиной, отдельными масляниками для вводов и для выпрямителей и т. д. Мы допускали на каждой подстанции круглосуточное дежурство одного или двух человек. Только при этих условиях имеют место приведенные выше формулы для определения оптимальной мощности подстанции.

Однако в ряде случаев вовсе нет надобности применять единую меру для всех подстанций. Мы можем количество подстанций брать и больше, чем при приведенной формуле, мощность каждой подстанции довольно малой, но зато удешевляет устройство подстанций, отказываясь по возможности от резервов. Так для малых подстанций можно: 1) иметь только фидер переменного тока, 2) не иметь запасных машин, 3) объединить вводной масляник с машинным, 4) не иметь формовочного трансформатора, 5) сократить число смен дежурств, исключая ночь (1-2 до 5-6) или даже вечер, 6) сократить совершенно дежурства, переходя к автоматическому или централизованному управлению.

Нельзя упустить из виду, что сокращение резервов означает необходимость, в случае выхода из строя того или иного элемента, перебросить всю нагрузку подстанции или часть ее на соседние подстанции. То же должно происходить в вечерние и ночные часы при сокращении числа дежурств. Эти возможности сильно зависят от многих местных условий, от расположения фидеров и т. д. Почти всегда потребуется некоторое усиление кабельной сети для такой переброски, которое должно быть также учтено. Но в результате такие сокращения часто позволяют существенно сократить расходы по кабельной сети, незначительно повышая стоимость подстанций. Такой комбинированный метод приведет к существенному повышению числа подстанций против приведенной выше теории. Ввиду чрезвычайной зависимости от местных условий трудно создать общую теорию для этих возможностей. Ограничимся приведением некоторых примеров, хотя и абстрактных, но достаточно объясняющих сущность дела.

Пусть дан некий район площадью $F = 6\,000\,000\text{ м}^2$, длиной путей $L = 10\,000\text{ м}$ по оси улиц, на котором общая рабочая мощность $2\,500\text{ А}$. Поскольку здесь $\gamma I = IF = 0,000416$, то оптимальная мощность $I_0 = 32\,000 \sqrt{\gamma L} = 2\,400\text{ А}$, т. е. почти равна наличной силе тока $2\,500\text{ А}$. Это значит, что в данном случае выгодно обойтись одной подстанцией вместо двух. В самом деле, если сравним вариант с одной подстанцией и вариант с двумя, то получим:

1-й вариант. Одна подстанция. Установленная мощность—3-РВ-16.

Полная стоимость (включая 2 фидера высокого напряжения)—366 000 руб. Расход на дежурства—13 700 руб. в год.

Ремонт и содержание оборудования—0,015 366 000—5 500 руб. Итого значит 19 200 руб.

Длины кабелей получается:

$$\text{Питательных} - r = 0,59 \sqrt{6\,000\,000} - 210 \sqrt{4} = 1\,200\text{ м.}$$

$$\text{Отсасывающих} - r' = 0,83 \sqrt{6\,000\,000} - 680 \sqrt{4} = 670\text{ м.}$$

Общее сечение как питательных, так и отсасывающих:

$$Q = 1,35; I - 3\,400\text{ мм}^2.$$

Стоимость кабельной сети:

$$0,03 (1\,200 + 670) 3\,400 = 190\,000\text{ руб.}$$

Потери в кабельной сети:

$$\frac{2\,500^2}{3\,400} \cdot \frac{(1\,200 + 670)}{57} \cdot 10^{-8} = 60\text{ kW.}$$

Дополнительная стоимость установленной мощности:

$$700 \cdot 60 = 42\,000\text{ руб.}$$

Годовая потеря энергии:

$$5\,000 \cdot 60 = 300\,000\text{ kWh.}$$

Стоимость энергии (текущие расходы):

$$300\,000 \cdot 0,04 = 12\,000\text{ руб.}$$

Итого по данному варианту:

Капитальные затраты: $366\,000 + 190\,000 + 42\,000 = 598\,000\text{ руб.}$

Текущие расходы: $19\,200 + 12\,000 = 31\,200\text{ руб.}$

2-й вариант. Две подстанции, каждая с полным резервом и круглосуточным дежурством.

Для каждой из них:

$$I = 1\,256\text{ А}; F = 3\,000\,000\text{ м}^2; Z = 5\,000\text{ м.}$$

Каждая подстанция получается из 2-РВ-16, стоимость по 262 000 руб., итого 524 000.

Годовые расходы на дежурства—2 13 700—27 400 руб.

Ремонт и содержание $0,015\,524\,000 = 7\,600\text{ руб.}$, итого значит 35 000 руб.

Длины кабелей получаются:

$$\text{Питательных} - r = 0,66 \sqrt{3\,000\,000} - 210 \sqrt{4} = 720\text{ м.}$$

$$\text{Отсасывающих} - r' = 0,83 \sqrt{3\,000\,000} - 680 \sqrt{4} = 80\text{ м.}$$

Общее сечение получится $1,35 \cdot 1\,250 = 1\,700\text{ мм}^2$ на подстанцию. Стоимость $2 \cdot 0,03 \cdot 1\,700 (620 + 80) = 82\,000\text{ руб.}$

$$\text{Потери энергии} 2 \cdot \frac{1\,250^2}{1\,750} \cdot \frac{(720 + 80)}{57} \cdot 10^{-8} = 26\text{ kW}$$

Потребные дополнительные капитальные затраты $700 \cdot 26 = 18\,000\text{ руб.}$

Годовые потери энергии $5\,000 \cdot 26 = 130\,000\text{ kWh.}$

Стоимость энергии $130\,000 \cdot 0,04 = 5\,200\text{ руб. в год.}$

Итого капитальных затрат—624 000 руб.

Текущие расходы—40 200 руб.

Как видно, вариант с одной подстанцией несколько выгоднее по капитальным затратам, но особенно выгоден по текущим расходам.

Еще более эффективный результат мы получим, если построим две подстанции, но на одной из них сократим всякий резерв до минимума, питая ее при надобности от другой подстанции. В этом случае одна подстанция оборудуется 2-РВ-16, двумя вводами и пр., вторая же подстанция получает только один ввод, один выпрямитель РВ-16 и один масляник. Сообразно с этим, стоимость первой подстанции 262 000 руб., стоимость же второй определится таким образом: выпрямитель—75 000 руб., кабель высокого напряжения—16 000, ввод и вывод кабеля—8 000, общая аппаратура—12 000 и здание—24 000 руб., итого 135 000 руб.

Стоимость обеих подстанций выразится в общем в 397 000 руб.

На первой подстанции устанавливаем дежурства круглосуточные (6 чел. в штате), на другой только в 2 смены (4 чел. в штате), так что расходы в год составят: дежурство первой подстанции 13 600 руб., дежурство второй подстанции 8 500 руб., содержание и ремонт $0,015 \cdot 3\,970\,000 = 6\,000\text{ руб.}$

Итого 28 100 руб.

Стоимость кабельной сети будет ниже чем по первому варианту, но выше чем по второму варианту; насколько—зависит от местных условий.

Примем, что стоимость повысится на 33%, т. е. получится $82\,000 \cdot 1,33 = 109\,000\text{ руб.}$

Установленная дополнительная стоимость на покрытие потерь останется без изменения (42 000 руб.), но годовые потери энергии увеличатся по сравнению со вторым вариантом за счет работы в вечерние часы примерно на 10%, т. е. составят $5\,200 \cdot 1,10 = 5\,700\text{ руб.}$

Итого составят: капитальные затраты—397 000 + 42 000 + 109 000 = 548 000 руб., текущие расходы—28 200 + 5 700 = 33 900 руб.

Этот вариант требует значительно меньших капитальных затрат, чем оба предыдущих. Правда, текущие расходы на 2 700 руб. в год больше чем при первом варианте, но это покрывается с избытком экономией капитальных затрат в 50 000 руб.

В качестве второго примера пусть на той же площади $F = 6\,000\,000\text{ м}^2$, суммарная мощность $I = 5\,000\text{ А}$, длина сети $L = 15\,000\text{ м}$.

Теоретическая оптимальная мощность

$$I_0 = 32\,000 \sqrt{\frac{5\,000}{6\,000\,000}} = 3\,000\text{ А.}$$

Оптимально число подстанций лежит между двумя и одной, но ближе к двум, так что останавливаемся на варианте 2 подстанций мощностью по 3-РВ-16, стоимостью 366 000 руб., итого 732 000 руб.

Длины кабелей:

питательных $-r = 0,66 \sqrt{3\,000\,000} - 210 \sqrt{3} = 780 \text{ м,}$

отсасывающих $-r' = 0,83 \sqrt{3\,000\,000} - 680 \sqrt{3} = 260 \text{ м.}$

Общее сечение кабелей на одну подстанцию— $3\,400 \text{ мм}^2$, так что стоимость кабельной сети выражается:

$$2 \cdot 3\,400 \cdot 0,03 (780 + 260) = 212\,000 \text{ руб.}$$

Потери энергии в час максимум:

$$2 \cdot \frac{2\,500}{3\,400} \cdot \frac{780 + 260 \cdot 10^{-3}}{57} = 67 \text{ kW,}$$

что вызывает дополнительные капитальные затраты — $67 \cdot 700 = 47\,000 \text{ руб.}$ и годовой расход энергии $67 \cdot 5\,000 = 335\,000 \text{ kWh}$ на сумму $335\,000 \cdot 0,04 = 13\,400 \text{ руб.}$ в год. Итого: капитальные затраты — $732\,000 + 212\,000 + 47\,000 = 991\,000 \text{ руб.}$, текущие расходы — $13\,400 + 2 \cdot 13\,700 + 0,015 \cdot 732\,000 = 13\,400 + 27\,400 + 11\,000 = 51\,800 \text{ руб.}$

Нет надобности в проверке простых вариантов с одной и с тремя подстанциями—они, очевидно, будут менее выгодны. Но имеет смысл просчитать варианты с тремя подстанциями, из коих одна или две без резерва. Так, например, можно построить три подстанции из РВ-10, причем на одной имеется резерв (3-РВ-70), на других только по 2-РВ-10 и по одному фидеру для каждой, с одним соединительным фидером для обеих подстанций. Стоимость первой подстанции, как мы видели, равна $289\,000 \text{ руб.}$, стоимость остальных двух складывается из:

2-РВ-10 — 2	55 000	110 000	руб.
1 $\frac{1}{2}$ фидера		30 000	"
1 $\frac{1}{2}$ ввода		18 000	"
Общая аппаратура		12 000	"
Здания		30 000	"

Итого $200\,000 \text{ руб.}$

Итого на три подстанции $289\,000 + 2 \cdot 200\,000 = 689\,000 \text{ руб.}$ Длины кабелей получаются (при $F = 2\,000\,000 \text{ м}^2$):

Питательных $-r = 0,66 \sqrt{2\,000\,000} - 210 \sqrt{3} = 570 \text{ м.}$

Отсасывающих $-r' = 0,83 \sqrt{2\,000\,000} - 680 \sqrt{3} = 0 \text{ м.}$

Сечение кабелей (на одну подстанцию)— $1,35 \cdot \frac{5\,000}{3} = 2\,250 \text{ мм}^2$.

Стоимость— $30,03 \cdot 2\,250 (570 + 0) = 104\,000 \text{ руб.}$

Усиление кабельной сети против теоретического минимума требуется небольшое, так как на каждой подстанции имеются 2 машины, и следовательно, при выходе из строя одной машины придется перебросить на первую подстанцию только примерно 40% нагрузки. Принимаем усиление на 10%, т. е. до суммы $114\,000 \text{ руб.}$

Потери энергии в час максимума равны:

$$3 \cdot \frac{1\,667^2}{2\,250} \cdot \frac{(570 + 0) \cdot 10^{-3}}{57} = 37 \text{ kW,}$$

чему соответствуют дополнительные капитальные затраты— $37 \cdot 700 = 26\,000 \text{ руб.}$

и годовой расход энергии $37 \cdot 5\,000 = 185\,000 \text{ kWh}$ на сумму $7\,400 \text{ руб.}$

Дежурство на обеих малых подстанциях принимаем только до 1 часа ночи, так что потребный штат сокращается на 1 чел.,

что дает экономии в год— $13\,700 \cdot \frac{5}{6} = 11\,500 \text{ руб.}$

Итого: капитальные затраты — $689\,000 + 114\,000 + 26\,000 = 829\,000 \text{ руб.}$

Текущие расходы— $7\,400 + 13\,700 + 211\,000 + 0,015 \cdot 821\,000 = 56\,500 \text{ руб.}$

Превышение по текущим расходам на $3\,700 \text{ руб.}$ в год покрывается экономией капитальных затрат на $161\,000 \text{ руб.}$, что безусловно выгодно.

Применяя подобные методы сокращения резерва на известной части подстанций в большем или меньшем размере, мы значительно снижаем среднюю оптимальную величину подстанции. По грубым соображениям можно предполагать, что против теоретического расчета выгодно увеличить число подстанций примерно в $1\frac{1}{2}$ раза. При этом, как видно из приведенных примеров, мы иногда дойдем до таких малых территорий подстанций, при которых нет надобности в отсасывающей кабельной сети. Итти еще ниже, уже нецелесообразно.

Еще больший стимул в сторону дальнейшего сокращения мощности подстанций получается при оборудовании части подстанций в качестве автоматических или централизованных. При этом отпадает основная причина для увеличения мощности подстанций—дежурный персонал. Однако ввиду отсутствия каких-либо данных о стоимости этого оборудования, о расходах на содержание и ремонт, мы пока эти возможности не рассматриваем.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Современные автоматические регуляторы

Н. Ф. Гонек и Гороян

ВЭО, Баку

Задача создания автоматического производства во всех отраслях промышленности, являющегося условием полного уничтожения противоположности между умственным и физическим трудом¹,—эта задача, положенная в основу составления генплана электрификации СССР, открывает автоматизации огромные перспективы применения в социалистическом хозяйстве.

Среди различных видов автоматизации автоматическое регулирование является наиболее старым. Регулятор числа оборотов—первый объект автоматизации—появился почти одновременно с паровой машиной. Теперь центробежный регулятор настолько сросся с управляемой им машиной, что никому не может прийти в голову осуществление, например, какой-либо турбины без регулятора. За последние годы применение автоматических регуляторов значительно расширилось, изменились к ним требования, а вместе с тем появились новые оригинальные системы. С одной стороны, чрезвычайно увеличилось число объектов регулирования (уровень, давление, температура, влажность и пр.), с другой стороны, возникли сложные схемы, комбинирующие работу ряда автоматов и регуляторов,—системы автоматизации сложных технологических процессов. Электрические системы, разработанные в последнее время, несколько запаздывающие по сравнению с гидравлическими, оказались не только способными конкурировать с ними, но даже во многих отношениях более совершенными.

Мы не будем касаться в этой статье сложных комбинированных систем регулирования и управления, в которых преимущественно электрических систем выступают особенно ярко. Здесь мы постараемся показать, каким образом новейшие системы разрешают основные противоречия, заключенные в проблеме регулирования. Не ставя своей целью теоретическое исследование процесса регулирования, на примере паровой машины постараемся уяснить, в чем заключаются эти противоречия. В этом случае мы имеем задачей регулировать подачу рабочего вещества в зависимости от изменения внешней нагрузки так, чтобы выполнялось основное требование, предъявляемое всякой машине-двигателю,—неизменность числа оборотов. Но вместо непосредственного измерения величины нагрузки мы прибегаем к измерению числа оборотов—к тахометру (поскольку каждый центробежный регулятор является в принципе тахометром)—и по изменению числа оборотов судим об изменении нагрузки. Этим одним обуславливается необходимость изменения регулируемой величины в процессе регулировки. Положение ухудшается еще тем, что в регулируемой системе мы имеем некоторую инерцию, и всякое отклонение регулируемой величины является причиной возникновения колебаний. Кроме того, расстояние между клапаном регулятора и его измерительным органом, которое должно пройти регулируемое вещество, значительно увеличивается в последних применениях регуляторов на химических производствах и поэтому вызывает явление запаздывания. Результатом работы в этих условиях обычных систем регуляторов бывает возникновение непрерывных колебаний.

¹ Резолюция майского совещания по составлению генплана электрификации СССР, раздел IV, п. 1.

Все эти обстоятельства служат причиной того, что регулятор никогда не дает совершенной стабильности регулируемого показателя. Изменения и колебания показателя вокруг некоторого „установочного положения“ всегда имеют место, и усилия конструкторов направлены поэтому на возможное уменьшение пределов этих колебаний. Одно увеличение чувствительности измерительного элемента оказалось недей-

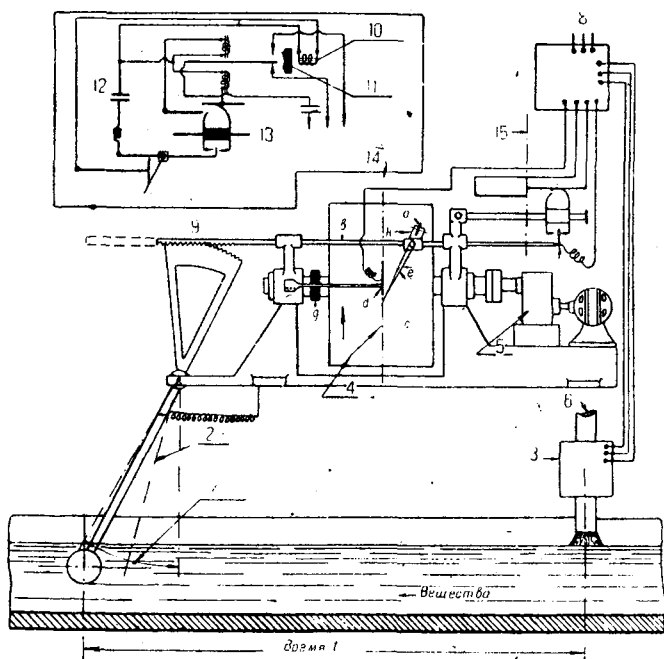


Рис. 1. Анализирующий (предсказывающий) регулятор. Схема механизма и электрических соединений. 1—рабочие пределы; 2—контрольная установка; 3—моторный клапан; 4—контрольная установка; 5—регулятор; 6—вода; 7—реверсивный переключатель; 8—линия; 9—схема соединений; 10—освобождающий соленоид; 11—защелка; 12—линия; 13—линия; 14—к реверсивному реле и клапану; 15—контрольная установка.

тельным средством в этом направлении. Решение задачи заключается в том, чтобы при регулировании доводить регулируемый показатель (например, температуру или давление) до установочного положения с минимальной скоростью; тогда можно предположить, что он остановится и удержится на этом значении некоторое время; в противном случае велика вероятность того, что вследствие инерции или запаздывания среднее положение будет перейдено в другую сторону, т. е. произойдет перерегулирование.

Появились тип аппаратов, которые можно назвать „анализирующими регуляторами“. Эти приборы помимо измерения основной регулируемой величины, что необходимо для того, чтобы судить, насколько она соответствует установочной величине, измеряют скорость, а также и характер ее изменения и связывают регулирование тем или иным способом со всеми полученными факторами (скорость, величина и направление отклонения).

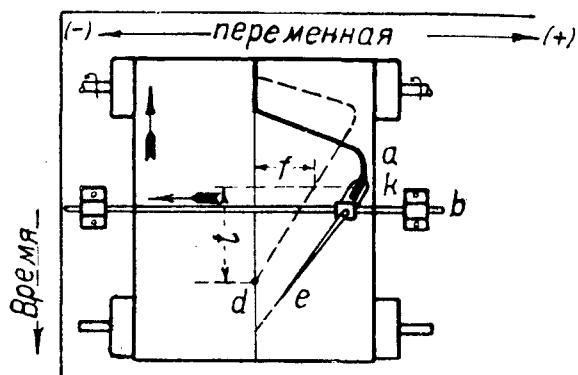


Рис. 2.

Примером самого последовательного проведения принципа анализирующего регулятора может служить устройство, схематически изображенное на рис. 1. Представленный здесь регулятор предназначен для поддержания постоянной консистенции полужидкой бумажной массы, протекающей по показателю

ному на рисунке жолобу. Регулирование осуществляется доведением к бумажной массе того или иного количества воды в зависимости от степени отклонения шара, определяющего ее консистенцию. Регулировочный клапан снабжен электрическим сервомотором, который его медленно открывает или закрывает в зависимости от направления тока, посылаемого реверсивными контакторами. Контактторы действуют под управлением сложного трехобмоточного реле. Для предотвращения перерегулирования применен анализирующий механизм, принцип действия которого поясним с помощью рис. 2.

Колесико *a* укреплено в державке *k* таким образом, что может катиться, касаясь бумаги, идущей с нижнего ролика на верхний. Державка скреплена со штангой *b* так, что она имеет возможность вращаться вокруг оси, перпендикулярной плоскости бумаги. Перемещения штанги в соответствии с изменениями величины регулируемого показателя, т. е. консистенции жидкости заставляют колесико чертить, касаясь по бумаге, кривую изменения этого показателя. При этом державка, увлекаемая колесиком, устанавливается по касательной к вычерчиваемой кривой; вместе с ней устанавливается прикрепленный к державке указатель *e*.

Предположим, что кривая отклонилась от установочного значения вправо, т. е. консистенция жидкости стала ненормальной. Тогда регулятор начнет открывать клапан. Как только это изменение остановится и начнет приобретать обратное направление, необходимо приостановить открытие клапана, не доводя его на некоторую величину до установочного значения, учитывая, что эффект произведенного открытия будет оказывать влияние на измерительный элемент еще в течение некоторого времени после остановки клапана (инерция, время запаздывания), иначе говоря, необходимо „предварение“ остановки сервомотора. Открытие надо остановить тем раньше, чем быстрее движется показатель консистенции к своему нормальному положению, т. е. чем больше скорость изменения регулируемого фактора. Последняя же определяется, как известно, наклоном касательной к кривой, т. е. наклоном указателя *e* (рис. 2). Если в точке *d* мы поместим электрический контакт, останавливающий каким-либо образом движение клапана, как только его коснется указатель *e* (в том только случае, если он идет к установочному, т. е. среднему положению), то поставленное требование будет выполнено. Чем быстрее будет двигаться колесико *a* к среднему положению, тем сильнее отклонится *e* от вертикали и тем скорее, не доходя на больший отрезок *f* до середины, замкнется контакт *d*. Таким образом в принципе, анализирующий механизм выключает сервомотор всегда за определенное время *t* до того момента, как регулятор должен был бы достигнуть установочного положения.

Переходя к электрической схеме, предположим снова, что *a* (рис. 1) отклонилось вправо. Через контакты *h* и *i* сработывает нижняя катушка трехобмоточного реле, причем якорь его задерживается защелкой, и мотор через реверсивные контакты пускается в соответственном направлении. При изменении направления движения *a* цепь реле рвется в *h*, однако клапан продолжает открываться до тех пор, пока не замкнется контакт *d*, вследствие чего освобождающая третья катушка притянет защелку, освобождая этим якорь реле. Тогда сервомотор останавливается и остается в этом положении все время, пока *a* „по инерции“ продолжает идти к установочному положению. Комбинация контактов *h* и *i* служит для определения направления движения. Если колесико, не дойдя до среднего положения, остановится, то регулятор останется в покое. Но лишь только *a* двинется опять в правую сторону, возобновится прежняя комбинация электрической цепи, и *a* будет принуждено направиться опять к установочному положению. Соответственно будет работать реле при отклонении регулятора влево.

На рис. 1 рулон бумаги заменен барабаном *c*, вращающимся с постоянной скоростью специальным электромоторчиком. Контакт *d* выполнен качающимся. За каждый оборот барабана контакт поднимается и опускается под действием кулачка *g*. Расстояние между штангой *b* и контактом *d* подбирается в зависимости от свойств регулируемого процесса.

Несколько более просто осуществляется предварение остановки сервомотора в механизме, представленном на рис. 3. В отличие от предыдущей системы, где сервомотор останавливался несколько после прохождения максимума, здесь сервомотор выключается как раз в момент изменения остановки регулируемого фактора, т. е. по достижении максимума отклонения. На рис. 3 проекция наконечника стрелки измерительной части регулятора (в данном случае—манометра), обозначенная буквой *a*, показана в трех различных положениях.

При изменении величины регулируемого показателя стрелка, вращаясь около горизонтальной оси, перемещается вверх или вниз. Клинообразный движок *b*, показанный справа (назовем его координатором), движется в горизонтальной плоскости при помощи эксцентрика, приводимого в движение мотором. Если стрелка находится в среднем положении, то при движении координатора справа налево она попадает в его вырез и никакого замыкания тока не произойдет. Если же к моменту движения координатора налево давление пара уклонилось от нормы и стрелка сдвинулась вверх или вниз, координатор захватывает ее и начинает двигать влево. При этом ввиду ступенчатой формы координатора стрелка отодвигается налево тем дальше, чем сильнее изменилось давление пара. При этом движении стрелка увлекает с собой одну из пластинок *c* или *d*: *c*—если давление пара увеличилось, и *d*—если оно упало. В свою очередь пластинка при начале своего движения налево немедленно замыкает соответствующий ей электрический контакт (на рис. 3 показан только контакт нижней пластинки), который остается в замкнутом состоянии до тех пор, пока пластинка продолжает двигаться влево.

При начале обратного движения пластинки контакт немедленно прерывается, тогда как контактор *e* удерживается на своем валу *f* трением и остается в том положении, в каком его оставила пластинка в своем крайнем левом положении.

При последующем движении координатора слева направо соприкосновение пластинки с контактором возникает только с того момента, как она касается контактора, оставленного ею в прежнем положении. Поэтому, если за протекший промежуток времени давление пара не осталось постоянно на уровне, отличном от нормального, валик, на котором сидит контактор, вращается со скоростью одного оборота в час, возвращая координатор медленно в его нормальное положение. При этом производится так называемое дорегулирование.

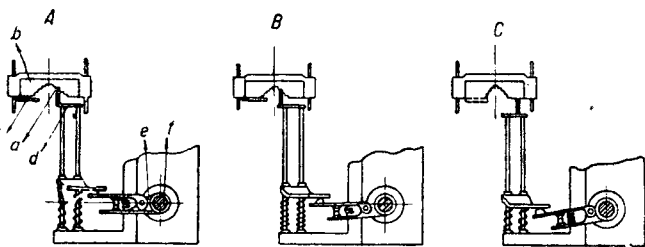


Рис. 3. Схема контактного механизма регулятора давления Bailei Meter Co.

Изложенный принцип регулирования применен фирмой Bailei Meter Co в автоматических регуляторных устройствах для котельных³.

В заключение рассмотрим еще одну систему регулятора, по своим свойствам объединяющую принцип анализирующего и обычного изотермического регулятора⁴.

В основном этот прибор предназначен для регулирования температуры. Измерительной частью его (рис. 4) является гальванометр.

Так как гальванометр обладает переустановочным усилием, далеко недостаточным для замыкания каких бы то ни было контактов, а также из соображений получения импульсов тока разной продолжительности, контакты выделены в особый механизм—токораспределитель, работа которого связывается с показаниями гальванометра помощью координатора. Этим достигаются также обусловленное кинематикой механизма автомата разделение и сдвиг во времени между изменениями отклонения стрелки и замыканием тех или иных контуров.

Центральной частью механизма является координатор. Он представляет собою рычажок, насаженный на валик 12 и имеющий возможность по нему продвигаться. На конце рычажка имеется пластинка, вырезанная в виде многоступенчатой лесенки 11. Помощью системы кулачков и рычагов координатор периодически поднимается вверх и прижимается к стрелке, которая в этот момент фиксируется в своем положении падающей рамкой 5. Стремя 17, имеющее гибкую пружинную связь с валиком координатора, устанавливает при этом свою переключательную в среднем положении либо выше, либо ниже его в зависимости от того, оказалась ли стрелка на средней ступеньке координатора, либо правее или левее ее. Положение стремени сейчас же фиксируется укладываемыми на нем тремя профильными рычажками 20, которые до этого были отодвинуты влево и оставляли стремя свободным.

Ложась на переключательную своими профильными выступами, рычаги занимают положение, соответствующее той или иной степени отклонения стрелки от середины координатора; один из них ложится более глубоко (правее), чем другие,

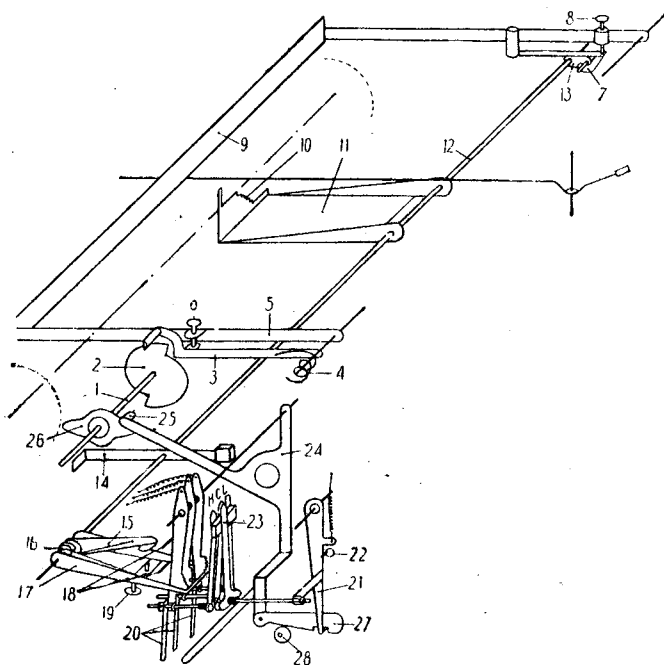


Рис. 4. Регулирующий и регистрирующий пирометр Брауна. Вид справа и сзади. Схема механизмов депрессорного, переустановочного и управления сервомотором.

Депрессорный механизм

1—кулачковый валик; 2—кулачок депрессора; 3—ведущий рычаг депрессора; 4—уравновешивающая пружина; 5—рамка депрессора; 6—регулирующий винт; 7—защелка депрессора; 8—регулирующий винт; 9—шкала; 10—стрелка гальванометра.

Переустановочный механизм

11—координатор; 12—валик координатора; 13—опускной рычаг координатора; 14—прижимной рычаг координатора; 15—натяжной рычаг стремени; 16—натяжные пружины стремени; 17—стремя; 18—ограничитель хода стремени; 19—регулирующий винт стремени; 20—установочные рычаги токораспределителя.

Механизм управления сервомотором

21—контактирующий рычаг токораспределителя; 22—упорный штифт; 23—контактные пружины токораспределителя; 24—главный рычаг токораспределителя; 25—ролик; 26—кулачок токораспределителя; 27—защелка токораспределителя; 28—направление защелки.

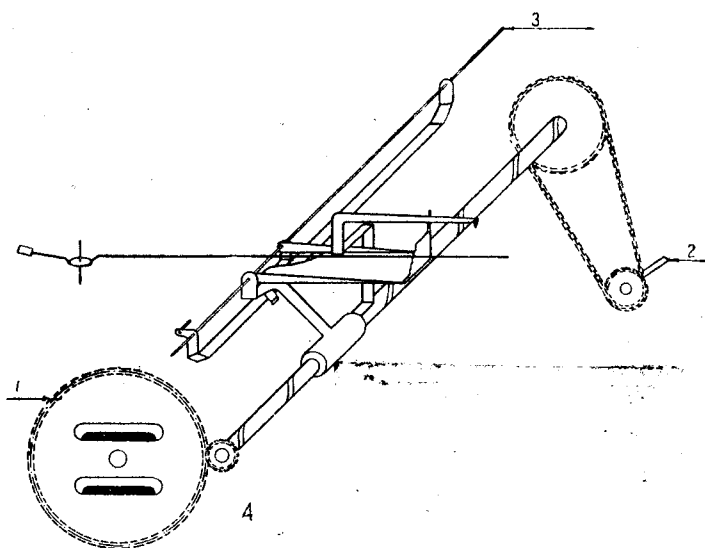


Рис. 5. Изотермический регулятор температуры Брауна. Схема механизма для передвижения координатора. 1—диск с ртутными переключателями; 2—к реверсивному мотору Уоррена; 3—к токораспределителю; 4—вид сверху и слева.

устанавливая при этом свою контактную пружину 23 в надлежащем положении впереди прочих. Таким образом величина и направление отклонения стрелки в данный момент занесаются в токораспределитель.

³ Довин и Барсуков, Современные американские станции, стр. 248.

⁴ Hüffe, т. 2, стр. 349.

После этого стрелка освобождается, а координатор опускается и занимает нижнее положение. Вслед затем Т-образная контактная пружина, начиная двигаться, справа налево, создает контакт с выдвинутой только что пружиной. Если стрелка отклонилась влево (вниз по шкале), замыкается контакт L , если вправо— H , если оказалась в центре— C . Продолжительность контакта получается тем больше, чем больше было отклонение стрелки. Контакт прекращается мгновенно, как только соскальзывает защепка 27.

Механизм приводится в движение небольшим моторчиком, обладающим постоянным числом оборотов, кулачковый валик делает 2 об/мин.

Для перемещения координатора в горизонтальном направлении служит реверсивный моторчик, также с постоянным числом оборотов (рис. 5). Координатор связан с кареткой, которая может перемещаться вдоль по валу 12 при помощи винта, вращаемого вышеупомянутым моторчиком. При отклонении координатора от установочного положения наклоняется также связанный с ним диск с ртутными контактами, причем ртуть замыкает ту или другую пару контактов.

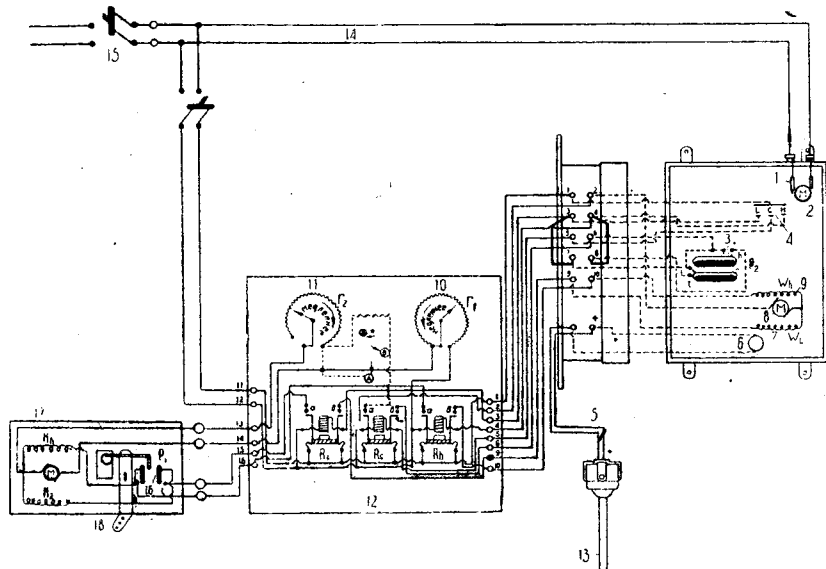


Рис. 6. Изодромный регулятор температуры Брауна (одномоторный). Схема соединений: 1—предохранитель; 2—мотор Уоррена; 3—ртутный переключатель; 4—контакторы токораспределителя; 5—регулирующий и регистрирующий пирометр (модель 861—81); 6—гальванометр; 7—вниз по шкале; 8—реверсивный мотор Уоррена; 9—вверх по шкале; 10—скорость регулировки; 11—скорость до регулировки; 12—контрольная панель (модель 1868); 13—термопара; 14—линия переменного тока; 15—предохранитель; 16—предельный переключатель; 17—сервомотор; 18—клапанный механизм (модель 1813 или 1814).

* При 110 kV соединения, как указано, с А; соединения В не нужно. При 220 kV соединения А разрывают и соединяют, как указано, по В.

Электрическая схема регулятора представлена на рис. 6. Работа регулятора происходит следующим образом. Пока температура имеет нормальную, т. е. установочную величину, сервомотор клапана находится в покое. Через каждые 15 сек. срабатывает контакт C , замыкаясь на 3 сек. При этом срабатывает реле R_c , однако все его цепи разомкнуты. Предположим, что температура стала повышаться. Стрелка гальванометра, уклоняясь вправо, заставляет замкнуться контакт H . При этом реле R_h , срабатывая, дает импульсы тока на сервомотор, который, прикрывая клапан, корректирует подачу вещества. Одновременно импульсы подаются на реверсивный мотор координатора для перемещения координатора вверх по шкале. Так как в момент посылки импульсов тока стрелка гальванометра свободна, координатор, перемещаясь, не может задеть и повредить ее.

Вместе со сдвигом координатора диск с ртутными контактами поворачивается, вследствие чего контакт P_{2h} замыкается. В этом регуляторе ртутные контакты исполняют роль, аналогичную скользящим контактам i на рис. 1, отмечая отклонения механизма регулятора от установочного положения, а также и направление этого отклонения.

Вследствие эффекта запаздывания измерительный механизм еще не может указать, каков результат произведенных коррекций; температура продолжает расти; однако рано или поздно координатор, перемещаясь вправо, догонит стрелку, вследствие чего явится замыкание C .

Если скорость возрастания температуры велика и расстояние между стрелкой и средней точкой координатора продолжает увеличиваться, продолжительность импульсов и, следовательно, средняя скорость перемещения координатора увели-

сте с ним и закрытие клапана, удваивается. Если и при этом расстояние не уменьшается, а увеличивается, то скорость утраивается, это получается в результате увеличения продолжительности контакта с трех секунд до девяти за каждый цикл, т. е. за 15 сек.

Таким образом скорость закрытия клапана ставится в зависимость от скорости изменения регулируемого показателя: чем быстрее изменяется температура, тем быстрее будет перемещаться клапан.

Как только средняя точка координатора окажется под стрелкой, начнет срабатывать реле R_c , а вместе с ним R_h . В результате к якору сервомотора приключается шунт, что уменьшает его скорость, цепь же реверсивного мотора координатора размыкается в R_{cb} , и координатор останавливается во вновь занятом положении. Клапан продолжает открываться за каждое срабатывание контакта C , но с меньшей скоростью. В случае нового повышения температуры координатор передвинется еще правее; в случае же, если температура начнет повышаться (в результате производимого корректирования, подачи), сработают контакт L и реле R_l . В результате координатор переместится на шкале вниз, а клапан несколько откроется. Однако последнее обстоятельство не будет иметь большого значения, так как вследствие перемещения координатора сейчас же опять начнет работать контакт C , и клапан снова будет закрываться. Координатор же окажется придвинутым к установочному положению. Это будет продолжаться до тех пор, пока температура, а вместе с ней и координатор не дойдут до установочного положения, после чего ртутный контакт P_{2h} разомкнется, и прекратится работа реле R_h и сервомотора. Регулятор примет исходное положение, клапан же будет несколько прикрыт. Для каждого случая применения скорость передвижения координатора регулируется сменными зубчатыми колесами, а мотора на клапане—реостатами.

Описанная система разработана фирмой Brawn Instrument Co⁵. Ею разработана также аналогичная схема с применением двухмоторного клапана.

Разобранные нами системы иллюстрируют, с одной стороны, как постепенно совершенствуется и усложняется перестановочный механизм регулятора вместе с применением более чувствительных измерительных элементов, с другой стороны, как усложняется механизм управления сервомотора по мере усиления борьбы с перерегулированием. Для того чтобы достигнуть хороших результатов в этом направлении, нужна гибкость регулятора, т. е. нужно, чтобы регулятор мог приспосабливать характер корректирования к любому характеру изменения процесса. Этим качеством описанные регуляторы обладают не в равной степени. Меньше всего отмечен им первый регулятор. Обладая лишь одной единственной скоростью перемещения клапана, он, очевидно, не сможет во время остановить скачкообразное большое изменение регулируемого показателя, следствием чего будет значительный пик на кривой регулировки. Возможность перерегулирования здесь также не исключена абсолютно, поскольку регулятор рассчитан на определенную величину времени запаздывания, а оно не является для данного процесса постоянным. Все же, если перерегулирование и произойдет—оно будет ликвидировано очень быстро.

Две другие системы, имея основное отличие в том, что их сервомотор повторяет движение регулирующего показателя и средняя скорость перемещения клапана всегда соответствует скорости изменения показателя, дают основание предполагать, что ими будут допущены меньшие отклонения от установочного значения регулируемой величины вследствие соответственных энергичных действий клапана; однако приближение к нормальному ходу процесса, т. е. дорегулирование, у них будет протекать по-разному.

Во втором приборе этот процесс дорегулирования нормально будет проходить довольно медленно. Если вследствие какой-либо внешней причины, действующей в ту же сторону, что и корректирование регулятора, давление начнет изменяться слишком быстро, то регулятор реагировать на это не будет, и в результате нормальное положение будет достигнуто со слишком большой скоростью, вследствие чего произойдет перерегулирование.

Если скорость возрастания температуры велика и расстояние между стрелкой и средней точкой координатора продолжает увеличиваться, продолжительность импульсов и, следовательно, средняя скорость перемещения координатора увели-

Третий же регулятор, удерживая регулируемую величину под контролем и во время движения к установочному положению, в описанном выше случае немедленно произведет отрицательное корректирование и этим предотвратит эффект перерегулирования.

Совершенно ясно, что работа регулятора в значительной мере зависит от того, насколько удачно налажен данный регулятор, т. е. насколько хорошо подобраны скорости и времени срабатывания различных его элементов. С этой точки зрения приобретают большое значение простота и легкость наладки. Регулятор, для наладки которого достаточно только подобрать надлежащую скорость перемещения клапана, может быть налажен быстрее, чем такой, у которого нужно найти наилучшую комбинацию скорости и положения предваряющего контакта. Регулятор, в котором регулировке подлежат более двух факторов, еще труднее поддается наладиванию, и очень часто сложный регулятор вследствие несоответствующей от-

регулировки будет давать результаты худшие, чем менее совершенный, но более простой.

Это положение определяет перспективы дальнейшего усовершенствования автоматического регулятора. Предусмотренная конструкцией многих регуляторов возможность приспособления его при помощи тех или иных подрегулировок к любому процессу будет в следующих системах заменяться увеличением автоматичности, увеличением диапазона его характеристик, т. е. увеличением гибкости регулятора в целом.

Необходимо, чтобы критическое освоение передового иностранного опыта по эксплуатации, конструированию и производству автоматического и контрольного оборудования шло в нашей стране в ногу с гигантским развитием сложнейших производств, обеспечивая бесперебойность, экономичность и высококачественность их работы на пути к полной технико-экономической независимости от капиталистических стран.

СТАВИМ НА ОБСУЖДЕНИЕ

Нужно ли заземлять нейтраль в установках низкого напряжения

А. П. Подольский

ВЭО, Москва

Еще в 1927 г. в статье „Анализ условий безопасности в трехфазных сетях низкого напряжения с заземленными и изолированными нейтральными точками“ („Электричество“, № 4, 1927) мною было высказано мнение, что в большинстве случаев заземление нейтральной точки трансформаторов не улучшает, а наоборот, ухудшает условия безопасности в сетях низкого напряжения, поскольку, конечно, речь идет о сетях не слишком протяженных. С тех пор эта тема сделалась предметом исследования еще двух авторов, которые применили иные методы математического анализа, но пришли все же к тем же выводам, что и я (см. проф. С. А. Пресс, „Электрические установки“, и инж. Н. В. Копытов, „Условия безопасности в кабельных фабрично-заводских сетях низкого напряжения“, „Электричество“, № 15, 1931). Последний из этих авторов в силу особенностей избранной им темы учитывал не только активное (омическое) сопротивление изоляции, но и емкость сети.

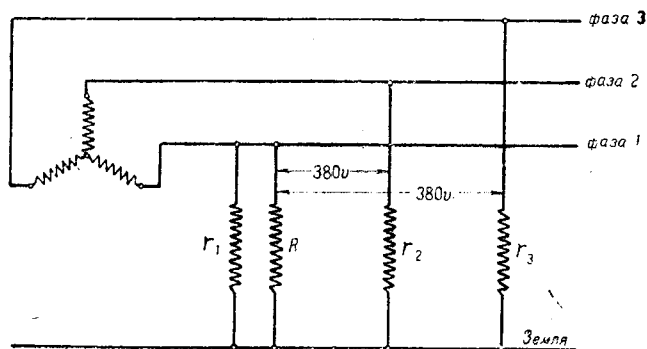


Рис. 1.

r_1, r_2, r_3 — сопротивление изоляции каждой из фаз; R — сопротивление человека.

Однако если со времени постановки мною данного вопроса математическая часть его и получила дальнейшее развитие, то весь вопрос в целом в отношении четкости формулировки, по моему мнению, требует того, чтобы к нему вновь вернуться. Попробую сделать это в самой сжатой форме.

Заземлять или не заземлять нейтраль в четырехпроводных сетях 380/220 V?

Позиция наших правил безопасности элементарно ясна.

При замыкании на землю в четырехпроводной сети 380 V с изолированной нейтралью напряжение здоровых фаз против земли поднимается до 380 V. Поскольку указанный аварийный режим может быть и нередко бывает сравнительно длительным и поскольку он нетерпим в осветительных сетях широкого общественного пользования, постольку четырехпроводная система 380/220 V с изолированной нейтралью не может быть отнесена к системам низкого напряжения.

Противники заземления нейтрали на это отвечают: улучшение условий безопасности достигается путем заземления ней-

трали лишь в отношении аварийных режимов, когда в сети имеется замыкание какой-либо фазы на землю.

Улучшение это достигается на время исключительных режимов изоляции сети за счет резкого ухудшения условий безопасности, отвечающих нормальным режимам изоляции. Неправильно ради улучшения условий безопасности, скажем, на 760 час. в году ухудшать их на время остальных 8000 час., когда состояние изоляции сети более или менее нормально и когда сопротивление изоляции отдельных фаз оказывает несравненно более сильное защитное действие, чем достигаемое заземлением нейтрали снижение напряжения аварийной цепи, в которую включен человек, с 380 до 220 V (рис. 1 и 2).

Если бы между каким-либо фазным проводом сети и землей последовательно с самопишущим амперметром было включено сопротивление, заменяющее сопротивление человеческого тела, а затем при помощи часового механизма автоматически включалась и выключалась бы нейтраль сети так, чтобы она, например, попеременно 20 мин. была заземлена и 20 мин. от-

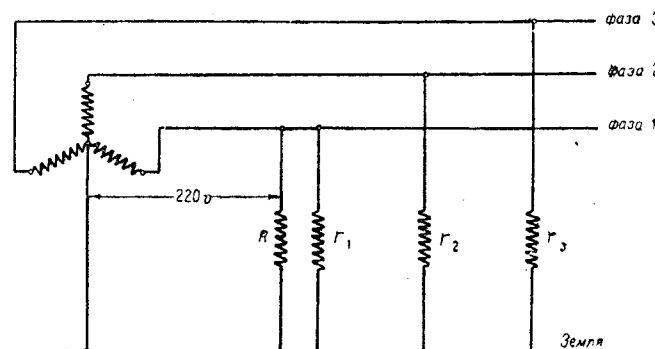


Рис. 2.

соединена от земли, то за год мы бы получили 365 суточных диаграмм, причем на каждой имелось бы по две пунктирных кривых, указывающих, какие токи проходят через тело человека при условии соприкосновения его с токоведущими сетями в любой момент как в случае изолированной, так и заземленной нейтрали.

Ясно, что такие кривые дали бы вполне наглядное представление об опасности прикосновений и в этом смысле могли бы именоваться „кривыми опасности“. Такие диаграммы можно было бы получить для различных величин сопротивления человеческого тела. На основании определенных данных о состоянии изоляции сети и проделанного математического анализа можно утверждать, что рассмотрение этих кривых, если бы они имелись, привело бы к следующим выводам: максимальные ординаты „кривой опасности“ будут больше при заземленной нейтрали, но зато среднее годовое значение „опасности“ будет значительно меньше при изолированной нейтрали. Если условно именовать периоды прохождения через

вышеуказанное сопротивление токов меньших, например, 0,025 А, периодом безопасным, от 0,025 до 0,05 А—периодом малой опасности, от 0,05 до 0,1 А—периодом большой опасности, а от 0,1 А и выше—периодом смертельной опасности, то заснятые графики показали бы для случая заземленной нейтрали значительно большую длительность периодов большой и смертельной опасности, чем для случая изолированной нейтрали.

На рис. 3 показан ориентировочно характер „кривых опасностей“, как он вытекает из работ противников заземления нейтрали.

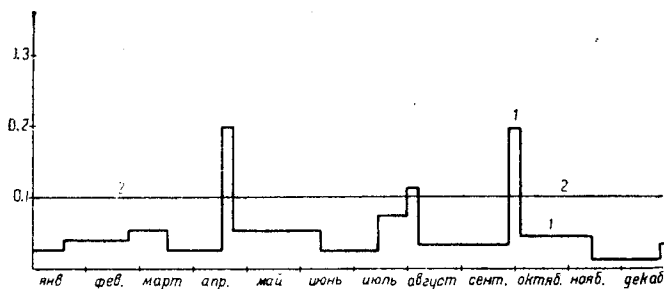


Рис. 3. Кривая 1—нейтраль изолирована; кривая 2—нейтраль заземлена.

Далее, если бы мы при неизменном режиме изоляции включили между фазовым проводом и землей последовательно с амперметром регулируемое сопротивление, изображающее сопротивление человека в различных условиях, то для многих часто встречающихся на практике режимов изоляции сети получили бы следующий неблагоприятный для заземления нейтрали результат: заземление нейтрали снижает без того безопасные точки, соответствующие значительным сопротивлениям человеческого тела, но зато оно увеличивает токи „большой“ и „смертельной“ опасности (характер кривой для одного частного случая виден из рис. 4). Наконец, для очень обширной области встречающихся на практике соотношений между сопротивлениями изоляции различных фаз, сети с изолированной нейтралью оказываются более безопасными при любом сопротивлении человеческого тела.

Таким образом против заземления нейтрали имеются весьма серьезные возражения математического порядка. Все же необходимо подчеркнуть, что вопрос нельзя считать окончательно решенным. О фактическом состоянии изоляции наших сетей нам ничего неизвестно. Мы не знаем, насколько часты и длительны замыкания отдельных фаз на землю в сетях низкого напряжения. Мы не знаем также величины сопротивлений изоляции в помещениях сырых, особо сырых и с едкими парами, так как эти величины даже не нормируются правилами.

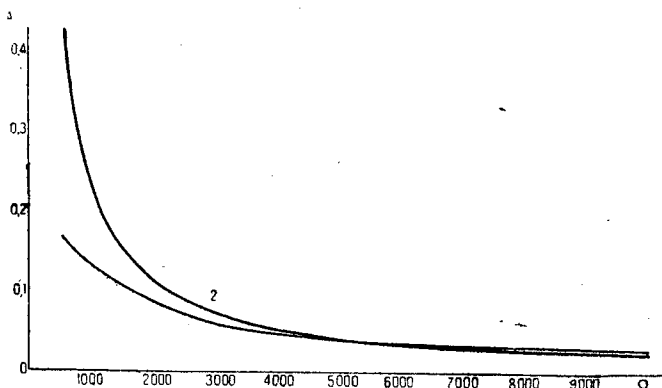


Рис. 4. Кривая 1—нейтраль изолирована; кривая 2—нейтраль заземлена.

Что касается сопротивления изоляции в сухих помещениях, то они хотя и нормируются, но эти нормы соблюдаются лишь при сдаче установки в эксплуатацию. Поэтому, для того чтобы проделанный математический анализ имел известное экспериментальное основание, необходима фотография фактического состояния изоляции наших сетей в течение длительных промежутков времени. Догадки и предположения в этом отношении недостаточны.

Неправильно было бы, однако, утверждать, что обязанность собирания экспериментального материала лежит на противниках заземления нейтрали. Общее состояние данного вопроса и, в частности, статистика несчастных случаев (хотя и не бо-

гатая) таковы, что сторонники заземления нейтрали вынуждены, по меньшей мере, признать это заземление сомнительной мерой „безопасности“. Было бы наиболее целесообразным, если бы и сторонники и противники заземления нейтрали отказались от своих теорий, вызванных за объективное разрешение этого вопроса, имея в виду, что в данном случае нет иного пути, как путь экспериментального исследования.

Интересно отметить, что изучение статистики несчастных случаев в электрических сетях также является не совсем надежным методом хотя бы по одному тому, что опубликованные материалы слишком бедны, а кроме того, они не содержат, да и не могут содержать всех необходимых сведений. Решение задачи и притом совершенно бесспорное может быть достигнуто путем создания, если можно так выразиться, искусственной статистики, т. е. воспроизведения искусственных несчастных случаев при помощи сопротивлений, изображающих человеческое тело в разных эксплуатационных условиях. Такие „несчастные“ случаи нужно воспроизводить в сетях попеременно, как при изолированной, так и при заземленной нейтрали в течение круглого года, снабдив экспериментальную цепь необходимыми измерительными приборами.

Следует отметить, что токи через опытные сопротивления лучше измерять непосредственно также и при заземленной нейтрали, несмотря на то, что в этом случае они, вообще говоря, постоянны по величине и могли бы быть легко вычислены, как мало зависящие от сопротивления изоляции отдельных фаз. Это рекомендуется для того, чтобы учесть возможное увеличение напряжения нейтрали по отношению к земле при наличии в сети замыкания отдельных фаз на землю через малые сопротивления.

„Искусственная статистика“ перед подлинной имеет большие методологические преимущества. В самом деле, при решении вопроса о сравнительных с точки зрения безопасности свойствах заземленной и изолированной нейтрали единственный фактор, который должен быть учтен,—это сравнительные величины токов, которые в одной и той же сети при одних и тех же сопротивлениях изоляции ее фаз проходят через человека с одним и тем же сопротивлением тела один раз при заземленной и второй раз при изолированной нейтрали.

Между тем, изучая анкеты о двух подлинных несчастных случаях, происшедших одновременно, хотя бы в одной и той же сети, мы имеем дело с различными и притом неизвестными нам величинами сопротивлений изоляции сети. Кроме того, мы не сумеем оценить значение индивидуальных факторов (сопротивление тела потерпевшего, физиологические и патологические особенности его и т. д.). При таких условиях легко впасть в ошибку, придавая фактору заземления или же изоляции нейтрали неправильное значение. Наоборот, заменяя человеческое тело сопротивлением, мы освобождаемся от искажающих факторов и, кроме того, получаем возможность единственный интересующий нас фактор—силу тока—измерять с помощью точных приборов.

Для упрощения дела следует измерять не сопротивление изоляции сети, а производный фактор—ток, проходящий через сопротивление, изображающее человеческое тело. При этом нет необходимости в сложной обработке экспериментального материала.

Полагаем, что совершенно бесспорные результаты можно было бы получить путем проведения экспериментальных исследований, например, в 5 заводских и 5 коммунальных сетях разной протяженности. Измерения желательно производить аккуратно „круглый год“ в одно и то же время, 2 раза в сутки, путем попеременного присоединения к каждой из фаз ряда сопротивлений, величина которых характеризует различные условия эксплуатации. Нижний член этого ряда может быть принят равным 1000 Ω и верхний—10 000 Ω, так как сопротивления человеческого тела по отношению к земле меньше, чем 1000 Ω, встречаются очень редко, а при сопротивлениях тела больших, чем 10 000 Ω, вряд ли бывают несчастные случаи, заслуживающие изучения.

В промежутке между 1000 и 10 000 Ω, по нашему мнению, достаточно поместить 3 сопротивления: 2000, 3500 и 6000 Ω. Для измерения лучше всего применить амперметр для непосредственного включения в цепь со шкалой не выше 0,25 А. Если в виде исключения шкала в отдельных случаях окажется недостаточной, то это обстоятельство просто следует отметить в протоколе измерений. Схема включения показана на рис. 5.

Таким образом каждый раз будет производиться $5 \times 3 = 15$ отсчетов при заземленной нейтрали, а непосредственно после этого столько же отсчетов при изолированном нуле, что в сутки для каждой из двух конкурирующих систем составит по 30 отсчетов, а в год около 11 000 отсчетов.

Единственное затруднение, с которым мы сталкиваемся при проведении данной программы, заключается в том, что в сетях, в которых применяется в качестве защитной меры зануление, а не заземление, нулевой провод не должен отсоединяться от земли даже на коротких промежутках времени, так как в противном случае при наличии в сети замыкания на землю какой-либо фазы корпуса всех зануленных приемников, находящихся во вполне исправном состоянии, окажутся под полным фазовым напряжением. Естественно, в экспериментальной сети нуль должен быть заземлен только в одном месте, так как отключать его от земли в нескольких местах при производстве измерений будет крайне неудобно. Таким образом для экспериментирования подойдут те из числа заводских установок 380/220 В с заземленной нейтралью, в которых в качестве защитной меры применяется не зануление, а заземление (такие установки в известном количестве имеются); подойдут также имеющиеся в эксплуатации установки 380/220 В без заземленного нуля, причем нуль в этом случае, поскольку это требуется при производстве измерений, соединяется с землей.

Что касается коммунальных сетей, то здесь либо придется искать установок 380/220 В, в которых зануление не применяется, либо экспериментировать над сетями 220 В с последующим пересчетом на 380 В путем простого умножения полученных при отсчетах величин на 1,73. Последнее представляется нам вполне допустимым, так как сети 220 В по способу монтажа и роду применяемых установочных материалов ничем не отличаются от сетей 380/220 В.

Благодаря применению метода непосредственного измерения силы тока, проходящего через сопротивления, изображающие человеческое тело, не будет никакой надобности в сложной обработке экспериментального материала. Результат будет особенно наглядным, если мы условимся в соответствии с величиной тока, прошедшего через сопротивление, оценивать последствия „несчастных случаев“ как нулевые, легкие, средней тяжести, тяжелые и смертельные (предлагаемые пределы токов см. выше). Этот результат мыслится в виде сравнительной таблицы „несчастных случаев“ для сетей с изолированной и заземленной нейтралью, с разбивкой их на заводские и комму-

нальные, кабельные и воздушные, с подразделением на протяженности и с разбивкой „несчастных случаев“ по роду последствий в процентах от общего числа.

Предложенная экспериментальная работа в первую очередь должна заинтересовать Наркомтруд и Энергоцентр, которые, надо надеяться, сумеют изыскать необходимые для ее проведения средства.

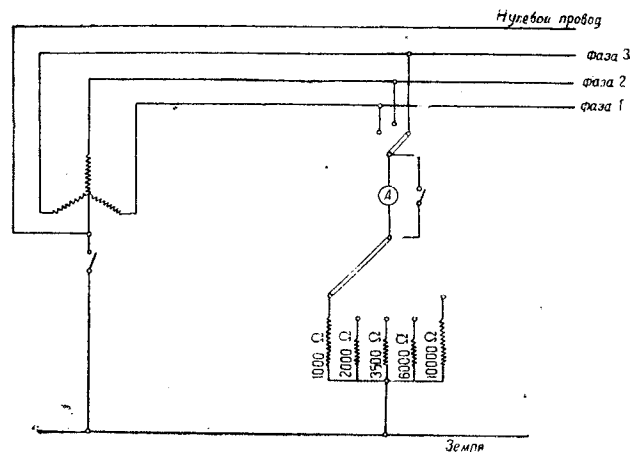


Рис. 5.

Однако программа исследований настолько проста, что это дает основание обратиться к инженерам, работающим в эксплуатации, с призывом провести исследования средствами лабораторий, имеющихся на предприятиях, и тем оказать самую действительную помощь в деле объективного разрешения вопроса, в котором так сильно заинтересованы электрики и органы охраны труда.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Аналитический расчет установившегося тока короткого замыкания

А. М. Залесский

Ленинград

Для расчета установившегося тока короткого замыкания Р. Рюденберг предложил чрезвычайно изящный графический метод, который с некоторыми усовершенствованиями был положен в основание руководящих указаний по расчету токов короткого замыкания, разработанных VDE¹. Этот метод достаточно широко известен, однако, нам необходимо вкратце его напомнить, так как в дальнейшем нам придется его частично использовать.

Расчет по методу Рюденберга—VDE требует знания характеристик холостого хода и короткого замыкания генератора. Характеристику холостого хода удобнее всего представить в относительных координатах u и i , где

$$u = \frac{U}{U_n}, \quad (1)$$

$$i = \frac{i_e}{i_{en}}. \quad (2)$$

U —э. д. с. генератора, U_n —номинальное напряжение генератора, i_e —ток возбуждения, i_{en} —номинальный ток возбуждения. Номинальным током возбуждения мы называем тот ток возбуждения, при котором э. д. с. генератора как раз равна его номинальному напряжению. Из этого определения следует, что величине $i=1$ всегда соответствует величина $u=1$. В дальнейшем мы будем пользоваться средней характеристикой холостого хода, предложенной VDE для предварительных расчетов токов короткого замыкания².

Характеристика короткого замыкания, т. е. зависимость

$$I_k = i(i_e), \quad (3)$$

представляет, как известно, прямую линию, проходящую через начало координат. Таким образом для построения характеристики холостого хода нам нужно знать одну ее точку. Обычно эту точку определяют, задавая ток короткого замыкания при возбуждении, соответствующем номинальному напряжению генератора. Если мы и характеристику короткого замыкания будем строить в относительных координатах, то эта точка будет определяться координатами

$$i=1, J_k = \frac{I_k}{I_n} = \xi. \quad (4)$$

Здесь I_k —ток короткого замыкания в амперах, I_n —номинальный ток генератора, J_k —относительный ток короткого замыкания. Коэффициент ξ мы будем называть „отношением короткого замыкания“. Зная характеристику холостого хода и отношение короткого замыкания, а также сопротивление рассеяния машины, мы можем построить треугольник Потье и определить реакцию якоря генератора. Для этого возьмем на характеристике холостого хода точку, соответствующую напряжению рассеяния генератора (точка А на рис. 1). Если сопротивление рассеяния генератора x_s задано в процентах, как это обычно бывает, напряжение рассеяния будет численно равно

$$\xi_s = x_s. \quad (5)$$

Таким образом построение точки А не представляет затруднений. Опустив из точки А перпендикуляр АВ на ось абсцисс, мы получим первый катет треугольника Потье. Для получения второго катета мы должны отложить на оси абсцисс ток возбуждения, при котором ток короткого замыкания равен номинальному ($J_k = 1$). Этот ток будет равен

$$i = \frac{1}{\xi}, \quad (6)$$

¹ Methode zur Berechnung von Kurzschlussströmen und Schalterleistungen. ETZ, 1929, стр. 242 и 279.

² СЭТ, отд. 10, § 20.

что нетрудно доказать из условия пропорциональности между токами I и J_k .

Откладывая на оси абсцисс величину $\frac{1}{\epsilon}$, получим точку C .

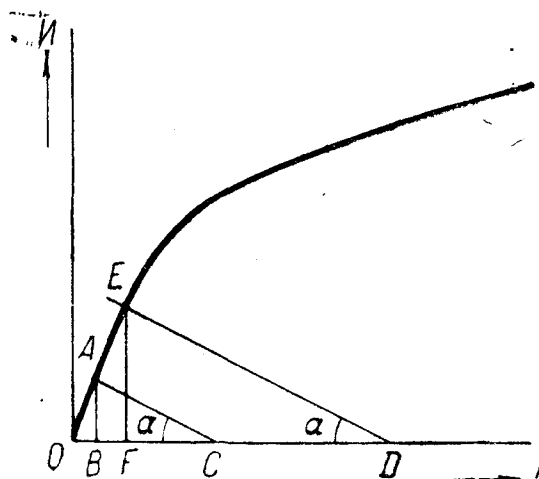


Рис. 1.

Отрезок BC даст нам второй катет треугольника Потье, изображающий реакцию якоря.

Напряжение короткого замыкания при коротком на зажимах машины может быть выражено так:

$$U_k = I_k x_B. \quad (7)$$

Разделяя уравнение (7) на U_n , получим:

$$u_k = J_k \epsilon_s = J_k \operatorname{tg} \alpha. \quad (8)$$

Нетрудно видеть, что гипотенуза треугольника Потье может представить уравнение (8), если мы поместим начало координат в точке C , ось J_k направим влево и отрезок BC примем за единицу. Напряжение u_k для какого-либо тока возбуждения, не равного OC , мы найдем, откладывая на оси абсцисс данный ток возбуждения $i = OD$ и проводя прямую $DE \parallel AC$. Точка E пересечения этой прямой с характеристикой холо-

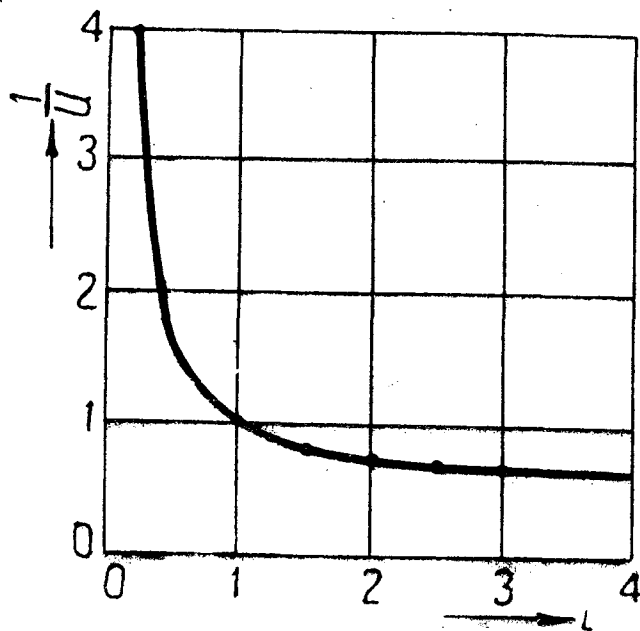


Рис. 2.

стого хода даст нам напряжение u_k . Ток короткого замыкания при возбуждении OD будет пропорционален отрезку DF , изображающему реакцию якоря. Так как отрезок BC мы приняли за единицу, то

$$J_k = \frac{DF}{BC}. \quad (9)$$

Если короткое замыкание не трехфазное, а двухфазное, построение ведется аналогичным путем, но только у точки C

надо построить угол, равный не α , а 2α . Другими словами, от точки B по линии AB следует отложить величину $2\epsilon_s$ и через полученную точку провести прямую в точку C . При однофазном коротком замыкании от точки B вверх следует отложить величину, равную от $2\epsilon_s$ до $3\epsilon_s$, в зависимости от типа обмотки генератора. Полученный по уравнению (9) результат при двухфазном коротком замыкании должен быть умножен на $\sqrt{3}$, а при однофазном — на 3.

Когда короткое замыкание произошло не на зажимах генератора, а в сети, построение ведется тем же способом, но вместо величины ϵ_s мы должны будем оперировать величиной $a\epsilon_s$, которая равна

$$a\epsilon_s = \frac{x + x_s}{x_s}. \quad (10)$$

Приведенное выше графическое решение задачи об определении установившегося тока короткого замыкания довольно просто, но все же во многих случаях желательно иметь воз-

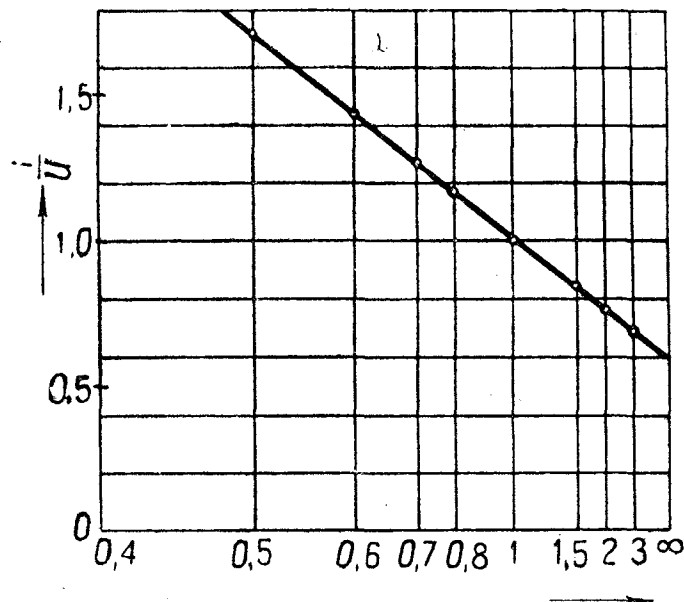


Рис. 3.

можность решить задачу не графически, а аналитически. VDE предложил для этого следующий метод. Ток короткого замыкания выражается уравнением:

$$I_{k3} = \frac{U_n \cdot k_2}{x_a + x_s}. \quad (11)$$

Здесь k_2 — коэффициент, учитывающий влияние насыщения машины, который может быть представлен в виде ряда кривых, в зависимости от возбуждения генератора и „коэффициента удаления“ a [уравнение (10)]. Далее,

$$x_s = \frac{\epsilon_s U_n}{I_n}, \quad (12)$$

$$x_a = \left(\frac{1}{\epsilon} - \epsilon_s \right) \frac{U_n}{I_n}; \quad (13)$$

x_a — сопротивление, эквивалентное реакции якоря. Уравнение (11) дает результат с точностью $2 \div 3\%$ по сравнению с точным графическим решением.

Для двухфазного короткого замыкания VDE дает аналогичную формулу:

$$I_{k2} = \frac{U_n k_2}{x_a + 2x_s}. \quad (14)$$

Коэффициенты k_2 и k_3 получаются путем кропотливых расчетов для разных значений тока возбуждения и коэффициента удаления.

Покажем, что, основываясь на графическом методе Рюденберга-VDE, можно построить очень точный метод аналитического расчета установившегося тока короткого замыкания. Для этой цели нам необходимо выразить характеристику холостого хода достаточно простой аналитической формулой. Эта задача оказалась легко разрешимой. Построим кривую, обратную кривой намагничивания генератора, т. е. кривую

$$\frac{1}{u} = f(i). \quad (15)$$

Это построение сделано на рис. 2. Полученная кривая имеет гиперболический характер. Попытаемся выразить ее уравнением такого вида:

$$\frac{1}{u} = a + \frac{b}{i^n}. \quad (16)$$

Путем подбора легко определить коэффициент n . Он равен 1,5, в чем можно убедиться при помощи рис. 3. Здесь по оси абсцисс отложена величина

$$x = \frac{1}{i^{1,5}}, \quad (17)$$

а по оси ординат величина $\frac{1}{u}$. В такой гиперболической системе координат уравнение (15) выражается прямой линией, что подтверждает правильность уравнения (16) и правильность выбора величины n . Из рис. 3 можно определить постоянные a и b . Полагая $i_n = \infty$, находим:

$$\frac{1}{u} = a = 0,61. \quad (18)$$

Полагая $i_n = 1$, находим:

$$\frac{1}{u} = a + b = 1. \quad (19)$$

Отсюда

$$b = 1 - a = 0,39. \quad (20)$$

Таким образом

$$\frac{1}{u} = 0,61 + \frac{0,39}{i^{1,5}}, \quad (21)$$

или

$$u = \frac{i^{1,5}}{0,39 + 0,61 i^{1,5}}. \quad (22)$$

Мы получили уравнение, которое очень точно передает кривую намагничивания генератора. К сожалению, это уравнение неудобно для расчета тока короткого замыкания, так как оно содержит дробную степень. Применяя уравнение (22) к определению тока короткого замыкания, мы получим уравнение первой степени, решать которое придется методом подбора или графическим путем. Таким образом мы не получим никакого упрощения по сравнению с графическим методом Рюденберга-VDE. Поэтому нам необходимо пойти по другому пути и подыскать такое выражение для характеристики холостого хода, которое содержало бы ток i в первой степени. Для того чтобы найти такое выражение, очень полезным оказался следующий способ. Разделим ток i на напряжение u , и полученную дробь отложим на диаграмме (рис. 4) как функцию i . Из рис. 4 мы видим, что эта функция изображается ломаной линией, состоящей из двух прямых, которые пересекаются при i , несколько большем единицы ($i \approx 1,1$). Каждую из этих прямых мы можем выразить уравнением.

Для $i < 1,1$ получим:

$$\frac{i}{u} = 0,75 + 0,25 i. \quad (23)$$

Отсюда

$$u = \frac{i}{0,75 + 0,25 i} = \frac{4i}{i + 3}. \quad (24)$$

Для $i > 1,1$ получим:

$$\frac{i}{u} = 0,44 + 0,537 i, \quad (25)$$

или

$$u = \frac{i}{0,44 + 0,537 i} = \frac{1,86 i}{i + 0,82}. \quad (26)$$

Приблизненно, уравнение (26) можно заменить следующим, очень удобным для запоминания уравнением:

$$u \approx \frac{2i}{i + 1}. \quad (27)$$

Во многих случаях точность, даваемая этим уравнением, будет совершенно достаточной. Понятие о величине ошибки, которую мы делаем, пользуясь уравнением (27) вместо уравнения (26), дает рис. 5.

Таким образом сделанное нами построение (рис. 4) дает возможность выразить характеристику холостого хода не одним, а двумя очень простыми уравнениями, каждое из которых пригодно для определенного участка характеристики. Применим полученные нами уравнения к расчету тока короткого замыкания. Пользуясь рис. 1, мы можем написать:

$$EF = DF \operatorname{tg} \alpha. \quad (28)$$

Но

$$EF = u \quad (29)$$

и

$$DF = OD - OF = i_1 - i. \quad (30)$$

Поэтому

$$u = (i_1 - i) \operatorname{tg} \alpha. \quad (31)$$

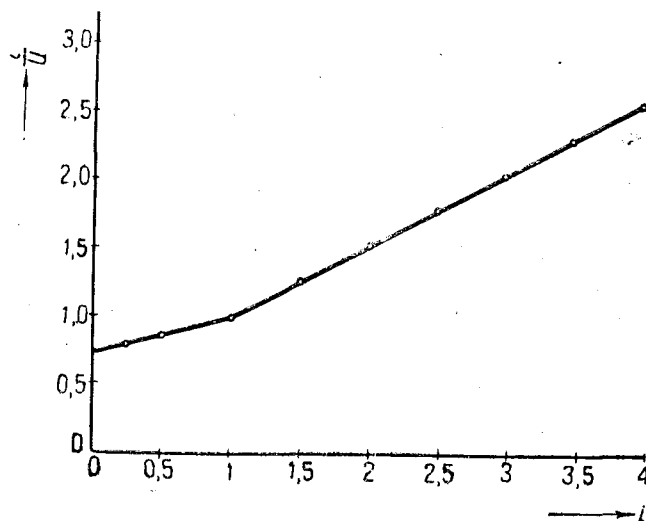


Рис. 4.

Пользуясь уравнениями (27) или (24), мы можем найти для двух участков характеристики холостого хода два следующих уравнения:

$$1) \quad \frac{2i}{i+1} = (i_1 - i) \operatorname{tg} \alpha, \quad (32)$$

$$2) \quad \frac{4i}{i+3} = (i_1 - i) \operatorname{tg} \alpha. \quad (33)$$

Решая уравнения (32) и (33) относительно i , получим:

$$1) \quad 2i \operatorname{ctg} \alpha = i i_1 + i_1 - i^2 - i, \quad (34)$$

$$2) \quad 4i \operatorname{ctg} \alpha = i i_1 + 3i_1 - i^2 - 3i \quad (35)$$

или

$$1) \quad i^2 + (1 + 2 \operatorname{ctg} \alpha - i_1) i - i_1 = 0, \quad (36)$$

$$2) \quad i^2 + (3 + 4 \operatorname{ctg} \alpha - i_1) i - 3i_1 = 0. \quad (37)$$

Отсюда

$$1) \quad i = -\frac{1 + 2 \operatorname{ctg} \alpha - i_1}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{1 + 2 \operatorname{ctg} \alpha - i_1}{2}\right)^2 + i_1}, \quad (38)$$

$$2) \quad i = -\frac{3 + 4 \operatorname{ctg} \alpha - i_1}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{3 + 4 \operatorname{ctg} \alpha - i_1}{2}\right)^2 + i_1}. \quad (39)$$

Перед корнем необходимо взять знак плюс, так как ток возбуждения i является величиной положительной.

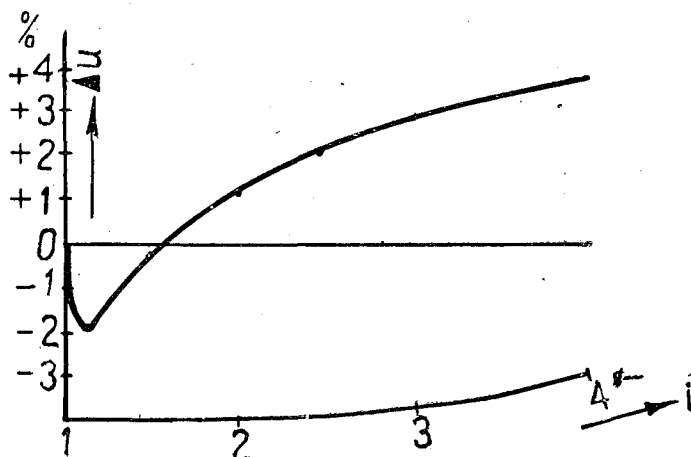


Рис. 5.

Определив ток i , мы можем найти и разность $i_1 - i$, так как величину i_1 мы предполагаем известной. Разделяя разность $i_1 - i$ на величину BC , мы получим, на основании уравнения (9), ток короткого замыкания:

$$J_k = \frac{i_1 - i}{BC}. \quad (40)$$

Величину BC мы можем выразить через параметры генератора ξ и ε_s . Из рис. 1 следует, что

$$BC = OC - OB. \quad (41)$$

Отрезок OC нам известен:

$$OC = \frac{1}{\xi}. \quad (42)$$

Отрезок OB мы определим, приняв приближенно, что на участке OA кривая OA совпадает с касательной к характеристике холостого хода. Обозначая угол AOB через β , получим

$$OB \approx \varepsilon_s \operatorname{ctg} \beta. \quad (43)$$

Для стандартной характеристики холостого хода можно принять

$$\operatorname{ctg} \beta \approx 0,83. \quad (44)$$

Таким образом

$$BC = \frac{1}{\xi} - 0,83 \varepsilon_s. \quad (45)$$

В результате,

$$J_k = \frac{i_1 - i}{\frac{1}{\xi} - 0,83 \varepsilon_s} = \frac{\xi(i_1 - i)}{1 - 0,83 \xi \varepsilon_s}. \quad (46)$$

Разность $i_1 - i$ мы можем определить и не определяя в отдельности величины i . Положим

$$i_1 - i = i'. \quad (47)$$

Тогда

$$i = i_1 - i'. \quad (48)$$

Подставляя уравнения (47) и (48) в уравнение (32), получим:

$$\frac{2(i_1 - i')}{1 + i_1 - i'} = i' \operatorname{tg} \alpha. \quad (49)$$

Отсюда

$$i'^2 - (1 + 2 \operatorname{ctg} \alpha + i_1) i' + 2 i_1 \operatorname{ctg} \alpha = 0 \quad (50)$$

и

$$i' = \frac{1 + 2 \operatorname{ctg} \alpha + i_1}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{1 + 2 \operatorname{ctg} \alpha + i_1}{2}\right)^2 - 2 i_1 \operatorname{ctg} \alpha}. \quad (51)$$

Здесь перед корнем должен быть взят знак минус. Далее получим:

$$J_k = \frac{i' \xi}{1 - 0,83 \xi \varepsilon_s}. \quad (52)$$

Применяя вместо уравнения (32) уравнение (33), мы совершенно аналогичным способом получим:

$$i' = \frac{3 + 4 \operatorname{ctg} \alpha + i_1}{2} - \sqrt{\left(\frac{3 + 4 \operatorname{ctg} \alpha + i_1}{2}\right)^2 - 4 i_1 \operatorname{ctg} \alpha}. \quad (53)$$

Входящая в уравнения (38) и (39) или (51) и (53) величина $\operatorname{ctg} \alpha$ может быть выражена через параметры генератора. Пользуясь рис. 1, мы найдем, что при трехфазном коротком замыкании

$$\operatorname{ctg} \alpha_3 = \frac{BC}{AB} = \frac{\frac{1}{\xi} - 0,83 \varepsilon_s}{\varepsilon_s} = \frac{1 - 0,83 \xi \varepsilon_s}{\xi \varepsilon_s}. \quad (54)$$

При двухфазном коротком замыкании $\operatorname{tg} \alpha$ удваивается, а при однофазном — увеличивается в $2 \div 3$ раза. Поэтому

$$\operatorname{ctg} \alpha_2 = \frac{1 - 0,83 \xi \varepsilon_s}{2 \xi \varepsilon_s}, \quad (55)$$

$$\operatorname{ctg} \alpha_1 = \frac{1 - 0,83 \xi \varepsilon_s}{(2 \div 3) \xi \varepsilon_s}. \quad (56)$$

Если короткое замыкание произошло не на зажимах генератора, а в сети, то это отразится на нашем расчете лишь тем, что тангенс угла α увеличится в a раз, где a — коэффициент удаления, определяемый уравнением (10). В соответствии с этим

при коротком замыкании в сети мы должны разделить уравнения (54), (55) и (56) на a .

Общий ход расчета по описанному нами методу таков. Пользуясь уравнением (51), мы определяем i' . Найдя затем по уравнению (48) i , проверяем, больше или меньше i , чем 1,1. Если $i > 1,1$, мы определяем J_k по уравнению (52). Если оказывается, что $i < 1,1$, следует определить i' по уравнению (53) и затем подставить его в уравнение (52).

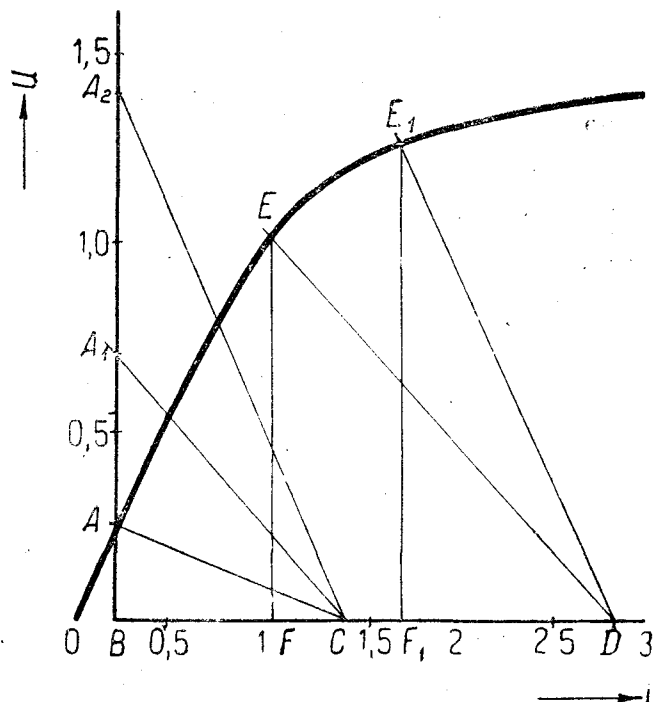


Рис. 6.

Заметим, что в пределах $0 < i < 1,1$ можно пользоваться уравнением (51), если не требуется большой точности расчета. Ошибка, которая при этом получится, в большинстве случаев не превышает $3 \div 4\%$, что при расчете токов короткого замыкания вполне допустимо.

Рассмотрим конкретный пример.

Станция мощностью 150 000 kVA питает 6-kV кабельную сеть. Генераторы имеют напряжение короткого замыкания $\varepsilon_s = 25\%$ и отношение короткого замыкания $\xi = 0,7$. Коэффициент мощности на станции в момент короткого замыкания был равен 0,65. Сопротивление кабеля до места короткого замыкания равно 0,13 Ω . Требуется найти двухфазный и трехфазный токи короткого замыкания.

Весь расчет будем вести для одной фазы. Определим прежде всего фазовую мощность и номинальный ток станции:

$$P = \frac{150\,000}{3} = 50\,000 \text{ kVA},$$

$$I_n = \frac{150\,000}{6,6 \sqrt{3}} = 13\,125 \text{ A}.$$

Сопротивление рассеяния генератора

$$x_s = \frac{6\,600^2 \cdot 0,25}{150 \cdot 10^6} = 0,0727 \Omega.$$

Коэффициент удаления

$$\alpha = 1 + \frac{x}{x_s} = 1 + \frac{0,13}{0,0727} = 2,79.$$

Определяем $\operatorname{ctg} \alpha$:

$$\operatorname{ctg} \alpha_3 = \frac{1 - 0,83 \xi \varepsilon_s}{a \xi \varepsilon_s} = \frac{1 - 0,83 \cdot 0,7 \cdot 0,25}{2,79 \cdot 0,7 \cdot 0,25} = 1,752.$$

Ток возбуждения i_1 , соответствующий полной нагрузке генераторов, и $\cos \varphi = 0,65$ найдем по формуле VDE:

$$i_1 = 1,08 + \left(4,45 \varepsilon_s + \frac{1}{\xi} - 0,43\right) F(\cos \varphi) = 1,08 + \left(4,45 \cdot 0,25 + \frac{1}{0,7} - 0,43\right) 0,832 \approx 2,836.$$

Горизонтальные отрезки между характеристиками холостого хода и реакции якоря, повидимому, представляют собой ампер-витки свободных токов в роторе, имеющие начальное значение EE' .

Построим на той же диаграмме кривую $EN''Q$, откладывая промежутки времени с начала короткого вниз от точки E' по формуле

$$x = EE' \cdot e^{-\beta t}, \quad (5)$$

где β — коэффициент затухания свободных токов в роторе. Величина β может быть определена экспериментальным путем или же в первом приближении принята равной

$$\beta = \frac{r_b}{L_b}, \quad (6)$$

где r_b — активное сопротивление цепи возбуждения, а L_b — индуктивность этой цепи.

Тогда для любого момента времени, отложив $t = E'N'$ по диаграмме, найдем значение ампер-витков токов в роторе $N'N''$.

Отложив $N'N''$ между характеристиками холостого хода и реакции якоря (см. выше), найдем соответствующие значения тока к. з. и э. д. с. генератора. Построение кривых изменения токов к. з., очевидно, не представляет дальше никаких затруднений.

Диаграмма рис. 1 построена по следующим данным: характеристика холостого хода взята по германским нормам, относительное возбуждение принято равным 2,5, что соответствует относительной э. д. с. 1,4. Относительный реактанс рассеяния принят равным 0,15. Коэффициент удаленности к. з.—4. Кратность установившегося тока к. з. на зажимах при возбуждении 2,5 принята равной 1,5, что соответствует крупным современным турбогенераторам.

Коэффициент затухания для простоты принят равным 1, что соответствует практическому затуханию роторных токов в течение 3 сек. Действительные коэффициенты затухания несколько выше и, кроме того, явление затухания благодаря наличию ряда цепей с различными постоянными времени протекает сложнее, чем по закону уравнения (5).

Плановая наметка актуальных материалов журн. „Электричество“ на 2-й квартал 1932 г.

Электроэнергетика капиталистических стран.

Технические сдвиги в электрификации капиталистических стран и проблема „догнать и перегнать“.

Материалы к генплану электрификации.

Освещение важнейших материалов конференции по генплану.

Социалистическая реконструкция и проблемы экономики электрохозяйства СССР.

Пути развития электропромышленности во 2-й пятилетке.

Задачи энергостроительства в 1932 г.

Проблема географич. размещения электропромышленности СССР.

Электроэнергетика и оборона страны.

Электростроительство и эксплуатация электрических станций.

Днепрострой — ряд статей.

Важнейшие вопросы эксплуатации электростанций и освоение новых мощностей.

Стандартное энергостроительство во второй пятилетке.

Проблема автоматизации электрических станций.

Высоковольтные электрические системы.

О технико-экономическом планировании единой высоковольтной сети.

О задачах научно-исследовательской работы по постоянному току высокого напряжения.

Ионные преобразователи.

Дискуссия в Комакадемии о технических проблемах единой высоковольтной сети.

Современные лаборатории высокого напряжения.

Обзор работ Отдела высокого напряжения ВЭИ.

Стол для расчета токов короткого замыкания.

Нахождение дефект. изоляторов в линии высокого напряжения.

Изоляторы на 220 и 380 kV.

Современные методы измерения рассеяния трансформаторов тока.

Защита высоковольтных трансформаторов от перенапряжения.

Обзор современных установок для испытания выключателей.

Современные воззрения на природу пробоя диэлектриков.

Электромашиностроение и трансформаторостроение.

Технические сдвиги в электромашиностроении СССР и капиталистических стран.

Современные тенденции развития конструкций синхронных генераторов и способов их защиты.

Современные двухполюсные турбогенераторы.

Турбогенераторный завод Уралэлектромашстроя.

Новое в вентиляции турбогенераторов.

Двухмоточные турбогенераторы и их рабочие свойства.

Озонирование в турбогенераторах.

Схемы гашения поля в синхронных генераторах.

Некоторые дефекты в конструкциях турбогенераторов.

Высоковольтные трансформаторы большой мощности.

Теория и способ действия фазокомпенсаторов.

Электрификация промышленности.

Электрометаллургия за границей и в СССР.

Задачи электрометаллургии в СССР.

Мощные индукционные печи для плавки металлов.

Электрохимия.

Развитие электрического привода в промышленности.

Электрификация нефтяной промышленности.

Современные автоматические регуляторы.

Электрификация транспорта.

Автоматическая кнопочная система управления электродвигателями.

Технико-экономические предпосылки электрификации железнодорожного транспорта во 2-й пятилетке.

Электротехнические проблемы Московского метрополитена.

Электрификация внутригородского транспорта.

Экономическая мощность трамвайных подстанций.

Универсальная диаграмма тяговых серийных двигателей.

Электрификация сельского хозяйства.

Перспективы электрификации сельского хозяйства во 2-й пятилетке.

Опыт организации МЭС в Нижней Волге.

Электрификация животноводческих совхозов.

Конструкция электропахотного агрегата.

Теоретические вопросы электротехники и задачи научно-исследовательских институтов.

Ленинградский электрофизический институт, его работа и задачи.

План работы ВЭИ.

Ряд отдельных проблем: фотоэлектричество и др.

Кадры.

Электротехническое образование в СССР во 2-й пятилетке.

Электрические измерения.

Отдельные статьи.

Светотехника.

Отдельные статьи.

Телевидение и фотоэлектричество.

Проблемы телевидения за границей и в СССР.
Телевизор на 300 элементов.
Телевидение на коротких волнах.

Звуковое кино.

Проблемы звукового кино за границей и в СССР:
Брауновская трубка для записи звуков.
Из книг и журналов (рефераты).
Библиография.

ИЗ КНИГ И ЖУРНАЛОВ

Линии передач

41. **Трактор ускоряет сооружение линий передач.**
„El. W.“, октябрь 1931, стр. 604, т. 98, № 14, стр. 604.

При сооружении двух 132-kV линий Union Electric Light & Power Co (St. Louis) значительную роль играли тракторы. Линии передачи проходят по неровной холмистой местности, 60% которой покрыто мелким лесом, и грунтовые дороги находятся в скверном состоянии, каменисты и извилисты. При установке П-образных опор столбы и траверсы развозились на прицепных тележках по шоссе и затем подавались с помощью трактора на трассу. Дерриковый кран, приспособленный к другому трактору, обслуживал подъем П-образных опор, для чего на тракторе была установлена лебедка, приводящаяся в движение мотором трактора. Благодаря применению деррика за день устанавливалось от 20 до 30 П-образных опор весом от 3 до 4 т каждая. При монтаже проводов трактор служил для раскатки проводов и перевозки инструментов. Трактор, снабженный лебедкой, облегчал регулировку стрелы провеса.

В условиях гигантского роста тракторизации нашего Союза следует практически поставить вопрос о широком применении тракторов при сооружении линий передач с учетом достижений передовой техники в этой области за границей.

П. Требулев

42. R. C. BERGVALL. **Последовательное включение омического сопротивления как средство увеличения динамической устойчивости.** Trans of the AIEE, сентябрь 1931.

Вопросы устойчивости параллельной работы являются весьма актуальными при сооружении больших электрических систем линий передач, связывающих отдельные районы нашего социалистического хозяйства.

Основная причина колебаний, возникающих в системе при аварии или неожиданном изменении нагрузки, — несоответствие между мощностью первичного двигателя и электрической отдачей генератора. При аварии (например коротком замыкании)

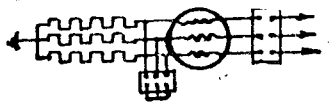


Рис. 1. Схема включения омического сопротивления.
Масляник A нормально включен.

обычно происходит значительный сброс активной мощности. Образующийся на роторе избыточный момент, равный разности между моментом первичного двигателя и электрическим моментом генератора, и обуславливает колебания ротора генератора около его синхронной скорости.

Предлагаемый в статье Bergvall метод увеличения устойчивости заключается в искусственном увеличении электрической отдачи генератора во время аварии включением в цепь главного тока большого омического сопротивления (предпочтительно в нейтраль генераторов (рис. 1). Это сопротивление нормально закорочено масляным выключателем.

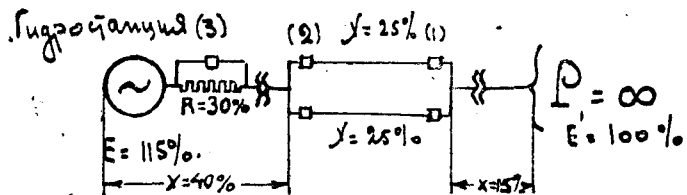


Рис. 2. Расчетная система электропередачи. P_1 — бесконечно мощный центр нагрузки.

Величина сопротивления — до 30% от мощности генератора. При возникновении аварии сопротивлению автоматически (до 6 периодов) включается в цепь генератора. Включение омического сопротивления повышает электрическую отдачу генератора (за счет увеличения потерь и снижает размах колебаний. Выключение сопротивления (закорачивание его) должно быть произведено через некоторое время после ликвидации аварии.

В статье приводятся итоги расчета динамической устойчивости системы, состоящей из гидростанции, питающей через двойную линию передачи центроагрузки с бесконечно большой мощностью (рис. 2).

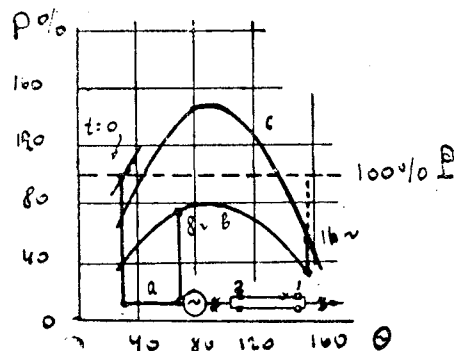


Рис. 3. Зависимость активной мощности от угла между э. д. с.
Случай без включения сопротивления.

Кривая	Время	Авария	MB_1	MB_2
a	0—8~	есть	включен	включен
b	8—16~	"	выключен	"
c	16—∞	ликвид.	"	выключен

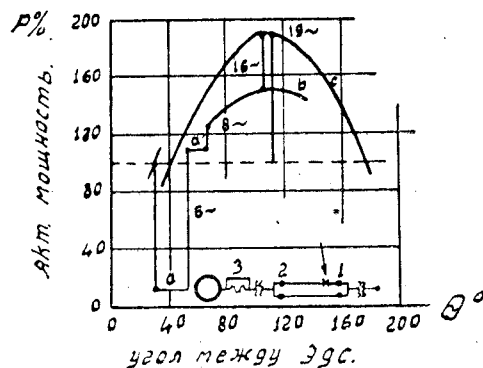


Рис. 4. Зависимость активной мощности от угла между э. д. с.
Случай с включением омического сопротивления

Кривая	Время	Авария	MB_1	MB_2	MB_3
a	0—6~	есть	включен	включен	включен
b	6—8~	"	включен	"	выключен
c	8—16~	"	выключен	"	"
d	16—(30—200)	ликвид.	"	выключен	"

Выключатель 3 включается через время от 30 до 200 периодов в зависимости от характеристик системы. Режим работы характеризуется кривой с рис. 3.

Соотношения постоянных системы приняты типичные.

На рис. 3 даны кривые мощностей системы в функции угла θ между напряжениями начала и конца системы для различных ее состояний. При трехфазном коротком на одной из линий передач (кривая мощности a) система явно неустойчива.

На рис. 4 также дана авария, но через 6 периодов по ее возникновении последовательно включается 30% омическое сопротивление. Система сохраняет устойчивость при наиболее суровой аварии — трехфазном коротком замыкании.

На рис. 5 представлены кривые качаний роторов гидростанции.

При менее суровых авариях система имеет значительный запас устойчивости.

Применение омических сопротивлений, включенных последовательно в наиболее слабых участках системы, влечет за собой падение напряжения на шинах приемника, что особенно вредно сказывается после ликвидации аварии.

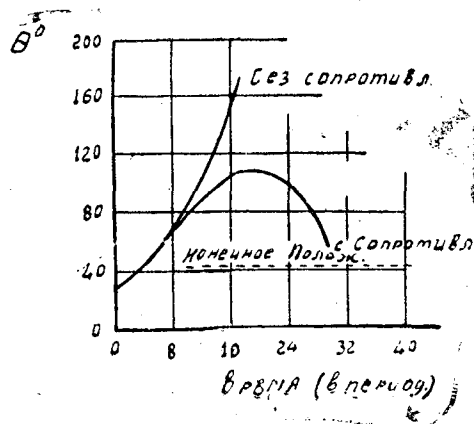


Рис. 5. Кривые качаний системы при трехфазном коротком

При неудачном выборе величины и места расположения сопротивлений их выключение при аварии может привести к ухудшению условий устойчивости.

Наличие сопротивления снижает активную мощность на приемном конце. Для указанного выше примера включение омического сопротивления повышает электрическую отдачу генераторов гидростанции на 40%, но уменьшает на 48% активную мощность на шинах потребителя.

Результат такого снижения может сказаться неблагоприятно, в особенности, если приемник энергии обладает малой инерцией. Таким образом применение омических сопротивлений зависит как от характеристик генераторов ведущей станции, так и от свойств всей системы.

Для каждой конкретной системы должно быть найдено оптимальное решение. В примере, приведенном в статье, даны наиболее благоприятные условия — потребитель бесконечной мощности. При действительных соотношениях дело несколько ухудшается, и выигрыш может быть небольшой.

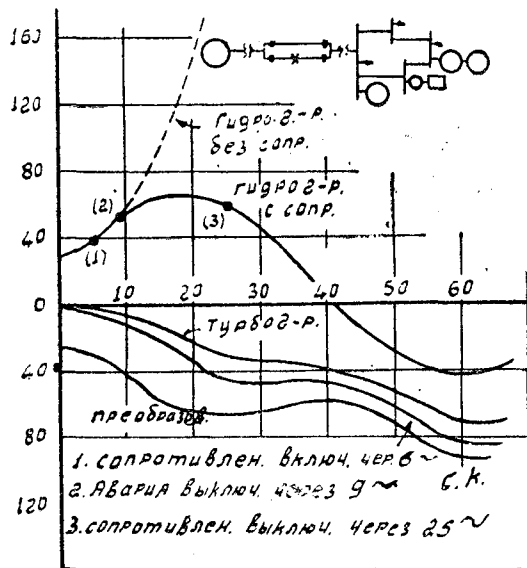


Рис. 6. Кривые качаний типичной системы при двухфазном заземлении на линии

Автор приводит результаты расчета устойчивости типичной системы: гидростанция, двойная линия передачи, синхронные конденсаторы, преобразователь частоты и турбогенераторы.

Рис. 6 дает кривые качаний при двухфазном заземлении на линии. Система выпадает из синхронизма без сопротивления и сохраняет параллельную работу при включении последнего. Аналогичный результат дали испытания в действительных условиях, проведенные автором.

Время выключения омического сопротивления автором точно не устанавливается. Статья предлагает 3 возможных варианта: выключение на гребне первого колебания, ступенчатое (постепенное) выключение и выключение через 2—3 сек., т. е. по окончании всех колебательных процессов.

Автор указывает на ряд технических и экономических преимуществ предлагаемого метода — сохранение параллельной работы в наиболее тяжелых условиях относительно дешевыми средствами — и считает, что данный вопрос должен быть детально изучен и обсужден.

С. Рокотян

43 Н. W. PAPST. Пропускная способность полых проводников. El. Journal, № 7, 1931 стр. 411—4.

В деле рационализации конструкций распределительных устройств наших электрических станций могут приобрести большое значение достижения передовой техники в области применения полых проводников.

Автор разбирает основные факторы, определяющие применение и расчет полых проводников, и приводит данные допустимых нагрузок для медных и алюминиевых шин различного устройства.

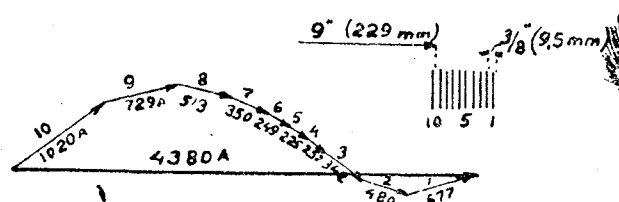


Рис. 1. Величины и угловые сдвиги токов в простой шине, состоящей из 10 медных полос $3" \times 1/8"$ ($76,2 \times 3,2 \text{ mm}$) с расстояниями в $3/8"$ ($9,5 \text{ mm}$). Показано расстояние до ближайшей полосы соседней шины

При применении простой шины, состоящей из многих параллельных полос, происходит вытеснение тока от средних полос к крайним вследствие скин-эффекта. Кроме того, при близком расположении обратной шины имеет место эффект близости (proximity effect), еще увеличивающий неравномерность распределения токов.

Пример распределения токов по величине и направлению в шине, состоящей из 10 параллельных полос, показан на рис. 1.

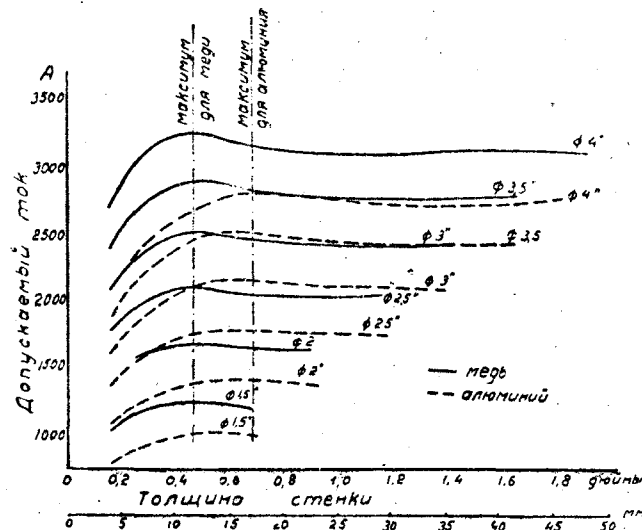


Рис. 2. Пропускная способность трубчатых проводников при допустимом повышении температуры в 30°C и 60 пер/сек при различных толщинах стенок. На кривых указан наружный диаметр труб

Вследствие угловых сдвигов между токами отдельных полос арифметическая сумма отдельных токов больше полного тока (4842 А против 4380). Очевидно, что при этом температура отдельных полос шины резко возрастает, а также увеличивается общее количество выделяемого тепла. Допускаемая температура шин задается при электрическом расчете обычно равной $70-75^\circ \text{C}$, что при температуре окружающего пространства в 40°C соответствует максимальному перегреву в 30° для равномерно нагреваемых проводников и 35°C для проводников с большими колебаниями температуры по сечению.

Для трубчатых проводников были определены с помощью формул кажущегося сопротивления, данных Dwight¹ и данных о рассеянии тепла Luke², допускаемые нагрузки для труб различных диаметров и толщин стенок. Токи определялись для повышения температуры в 30°С и проводимость меди—в 99% (рис. 2) и алюминия—в 60% (частота—60 пер/сек.).

Кроме того, для торговых размеров труб составлена табл. 1. Для токов свыше 2000 А трубы становятся неудобными по габаритам и весу по сравнению с конструкциями из полос.

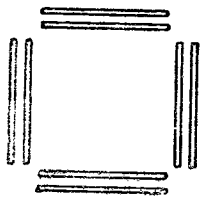


Рис. 3. Расположение полос по «полому квадрату»

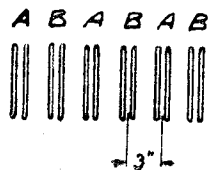


Рис. 4. Поперемное расположение разноименных шин

Шина, состоящая из отдельных полос, расположенных по полному квадрату (рис. 3), сохраняет преимущества труб в отношении равномерности распределения токов, но имеет поверхность охлаждения почти в 2 раза меньшую, чем у простой шины, состоящей из полос, поставленных на ребра.

Таблица 1
Нагрузки труб в амперах (60 пер/сек, перегрев 30°С, проводимость меди 99%, алюминия 60%)

Номинальный размер трубы по сортаменту железных труб в дюймах	М е д ь		Алюминий	
	нормальная	утяжеленная	нормальная	утяжеленная
1/2	450	510	350	390
3/4	570	635	435	490
1	740	840	570	650
1 1/4	940	1080	735	840
1 1/2	1075	1240	835	970
2	1360	1595	1060	1240
2 1/2	1840	2100	1430	1655
3	2230	2570	1730	2070
3 1/2	2540	2940	1980	2300
4	2880	3300	2230	2610

Несравненно лучшие результаты дает улучшенное расположение по полному квадрату, отличающееся как хорошим распределением токов, так и большой поверхностью охлаждения

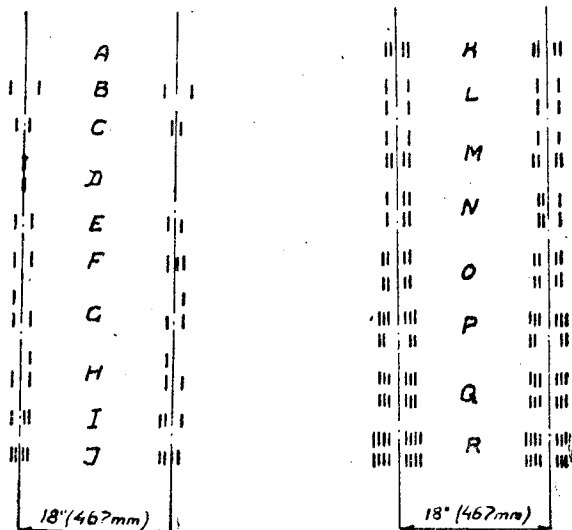


Рис. 5. Типы сложных шин, состоящих из различного числа полос, расположенных по «улучшенному полному квадрату». Расстояние между осями шин 18" (467 mm); малые промежутки между полосами 1/4" (6,35 mm); большие—2 1/2" (63,5 mm)

¹ Dwight B. H. Skin effect and proximity effect in tubular conductors. Trans. AIEE, Vol. XLI, 1922 p. 189.
² Luke G. O. Current capacity of wires and cables. El. Ingn. April, 1923, p. 127.

На рис. 5 приведены различные применяемые расположения полос, а на рис. 6 кривые дают соответствующие допустимые нагрузки для медных полос 6" × 1/4" (152,4 × 6,35 mm) и 4" × 1/4" (101,6 × 6,35 mm) в однофазной цепи. Значения токов для алюминиевых шин могут быть получены из них по множению на 0,8.

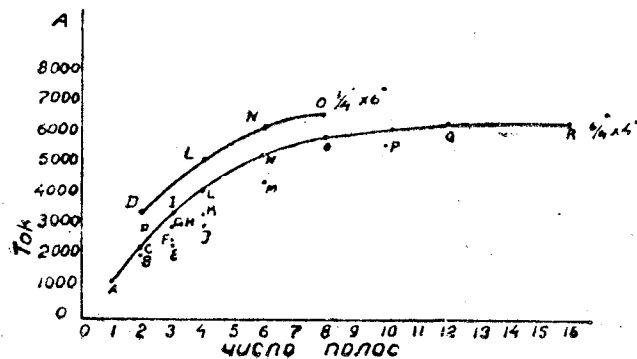


Рис. 6. Пропускные способности медных шин, соответствующих рис. 5. Размер полос 4" × 1/4" и 6" × 1/4". Однофазная цепь 60 пер/сек. Максимальное повышение температуры 35°С

Для сравнения приведена таблица допустимых нагрузок шин составленных из тех же полос, но поставленных в один ряд с расстояниями в 1/4" (табл. 2).

Таблица 2
Пропускная способность простых медных и алюминиевых шин

Число полос 4" × 1/4"	Нагрузка в А	
	М е д ь	Алюминий
1	1350	1050
2	2250	1860
3	2500	2060
4	3000	2500
5	3000	2500

Кривые рис. 6 и табл. 2 относятся к однофазной цепи и максимальному перегреву отдельных частей полос в 35°С. Те же значения применяются и для трехфазной цепи, благодаря чему получается незначительный запас.

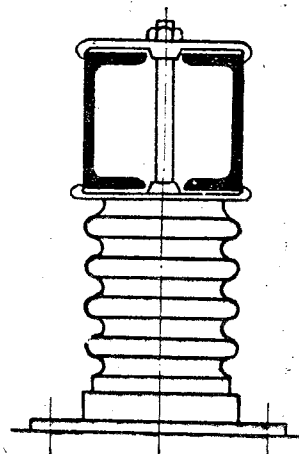


Рис. 7. Шина из двух швеллеров

Прекрасные результаты дает также поперемное расположение полос различной полярности (рис. 4). Наконец, новая конструкция шин, более простая, чем «улучшенный квадрат», но соединяющая все его достоинства,—это конструкция из двух швеллеров нормального сечения, обращенных друг к другу полками и со щелью между ними, достаточной для вентиляции внутренних поверхностей. Допустимые величины токов

для алюминиевой шины, состоящей из двух корыт, образующих полый квадрат, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Пропускная способность алюминиевых шин из 2 швеллеров

Высота швеллера		Толщина стенки mm	Для двух швеллеров		Нагрузка А	Примечание референта
Дюймов	mm		Сечение mm ²	Вес kg/m		
4	101,6	6,27	2 375	6,62	2 700	В подлиннике все размеры и вес швеллеров приведены только в английских мерах
5	127,0	8,25	3 410	9,54	3 700	
6	152,4	11,1	4 930	13,8	4 800	
7	177,8	13,3	6 540	18,3	5 900	
8	203,2	14,7	8 060	22,6	6 700	

Устройство подобной шины показано на рис. 7 и общий вид шин на рис. 8.

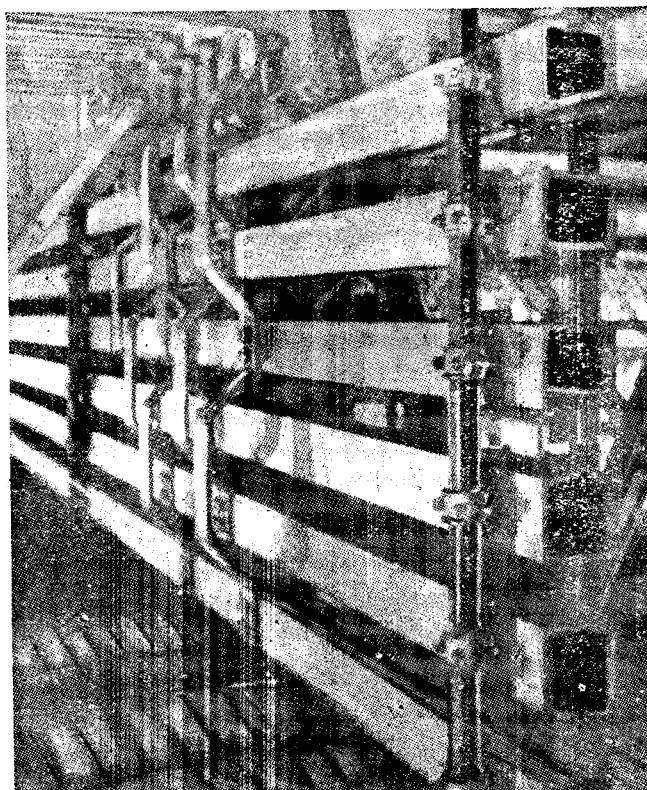


Рис. 8. Вид шинного устройства низкого напряжения из швеллеров

Пролет между опорными изоляторами может быть принят в 15—20 футов (4,5—6 м). Конструкция шинодержателей должна допускать продольные перемещения, чтобы температурные расширения не воспринимались опорными изоляторами.

В заключение автор приводит данные падения напряжения в простых шинах и шинах с расположением полос по улучшенному полюсу квадрату.

Г. А. Брейтермани

44. RADZIEWSKY. Влияние высоты над уровнем моря на выбор наименьших расстояний и выбор аппаратуры высоковольтных установок. „Helios“, № 40, октябрь 1931.

Автор статьи указывает на то, что в литературе совершенно не имеется практических указаний относительно выбора аппаратуры и наименьших расстояний в высоковольтных установках на больших высотах над уровнем моря в горных местностях. В данном случае особую важность представляет разрядное напряжение, которое определяет степень электрической надежности всей установки. Разрядное напряжение снижается с уменьшением давления воздуха и повышением его темпе-

ратуры. Оба этих важных фактора на разных высотах над уровнем моря различны по величине, и поэтому особое значение приобретает вопрос об исходных данных при проектировании.

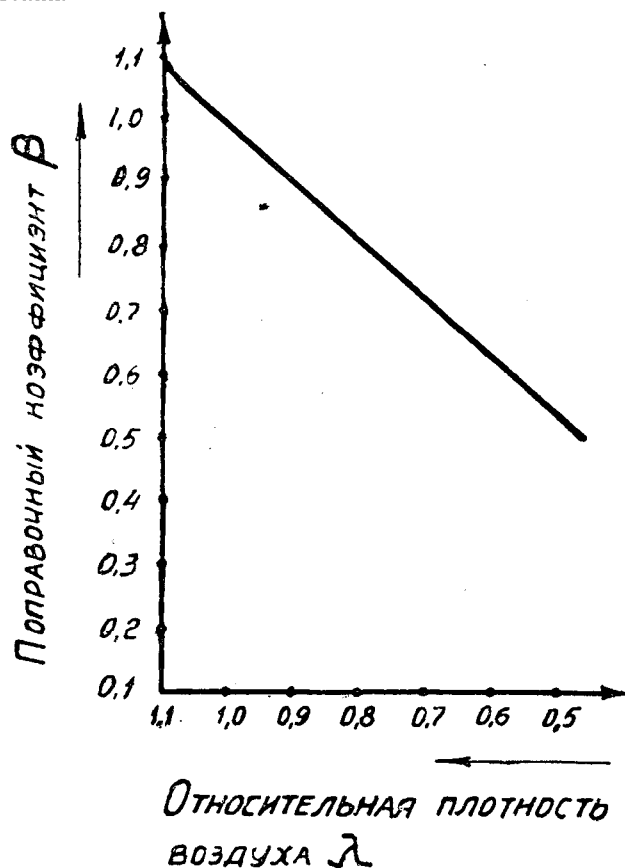


Рис. 1.

Автор исходит из немецких норм, принимая нормальные величины для разрядного напряжения, номинального и испытательного, для высот до 1 000 м над уровнем моря, давления 760 мм рт. ст. и 25° С. При высоте над уровнем моря свыше 1 000 м разрядное напряжение снижается, и поэтому в равной степени оно должно быть снижено для изоляторов.

В случае желательности сохранения коэффициента запаса одинаковым для всех высот при выборе изоляторов и аппаратуры приходится принимать во внимание высоту установки и затем или снижать величину рабочего напряжения или же, учитывая высоту, соответственно увеличивать (при данном рабочем напряжении) номинальное напряжение. Отношение рабочего напряжения на данной высоте к номинальному различно для разных высот установок и температур и называется поправочным коэффициентом β . Для нормальных условий $\beta = 1$. При высоких температурах и больших высотах этот коэффициент значительно меньше. Обычно $E_{bh} = E_n \beta$, где E_{bh} — сниженное допустимое рабочее напряжение на высоте h над уровнем моря в киловольтах, а E_{bn} — требуемое номинальное напряжение и β — поправочный коэффициент, учитывающий давление, температуру и влажность соответственно высоте установки над уровнем моря. Величина $E_n = \frac{E_{bh}}{\beta}$ киловольт

может быть получена из табл. 1 и кривой рис. 1.

Таблица 1
Относительная плотность воздуха λ при различных температурах и высотах над уровнем моря

Температура t° C	Высота над уровнем моря в м						
	1 000	1 500	2 000	2 500	3 000	3 500	4 000
	Значение относительной плотности воздуха						
0	0,960	0,910	0,850	0,800	0,755	0,705	0,665
15	0,915	0,860	0,810	0,760	0,720	0,670	0,630
25	0,880	0,830	0,780	0,730	0,690	0,640	0,610
35	0,855	0,805	0,755	0,710	0,665	0,625	0,585

Поясним примером. Для высоты 2 500 м по табл. 1 находим для 25°C $\lambda = 0,730$, после чего по кривой 1 для этой относительной плотности воздуха находим поправочный коэффициент $\beta = 0,755$. Если принять рабочее напряжение на этой высоте равным 70 kV, то наименьшее номинальное напряжение для выбора аппаратуры будет $E_n = \frac{70}{0,755} = 100 \text{ kV}$. При высоте

над уровнем моря свыше 1 000 м американские нормы предусматривают снижение нормального значения напряжения на 1% на каждые 100 м высоты. Следовательно, при высоте 3 000 м допустимое рабочее напряжение для изоляторов и аппаратуры снизится на $\frac{3\,000 - 1\,000}{100} 1\% = 20\%$.

Очень важным является расчет разрядного напряжения для различных условий при высоте свыше 1 000 м. В табл. 4 указан поправочный коэффициент для шаровых разрядников в зависимости от относительной плотности воздуха, значение которой берется из табл. 1, где учитываются температура и высота над уровнем моря. Табл. 2 дает возможность определить, какое для данной высоты требуется выбрать номинальное напряжение для аппаратуры при заданном рабочем напряжении. Автор при составлении этой таблицы исходил из рабочих напряжений по нормам AIEE и BESA и определил номинальные напряжения, подводя под нормы VDE. Если степень надежности работы аппаратуры желательно иметь величиной постоянной при всех высотах, то необходимо будет снизить допустимое рабочее напряжение при соответствующем номинальном напряжении согласно табл. 2. При измерениях с искровыми промежутками при других температурах и баро-

и отклоненных проводов для особых условий в зависимости от высоты сооружения над уровнем моря необходимо помнить, что критическое напряжение также зависит от давления воздуха и обратно пропорционально абсолютной температуре его. При расчетах критическое напряжение лучше допускать

Таблица 2

Наименьшее расстояние для неподвижных и отклоненных проводов для внешних и внутренних установок на уровне моря

kV	Неподвижные провода			A_{FS} —расстояние в м для проводов, могущих колебаться					
	A_i mm	$A_F = 1,5 A_i$	45 kV	Пролет в м	$P = 4 \text{ kg/mm}^2$		80 kV	$P = 4 \text{ kg/mm}^2$	
					$P = 4 \text{ kg/mm}^2$	$P = 8 \text{ kg/mm}^2$		$P = 4 \text{ kg/mm}^2$	$P = 8 \text{ kg/mm}^2$
3	95				10	80	80	110	105
10 (15)	155				20	80	80	120	115
20	235				30	90	85	130	125
30	315	475 mm			40	110	95	150	135
45	440	660			50	130	105	170	150
			60 kV						
60	550	830			10	80	80	130	125
80	710	1 065			20	85	80	140	135
100	890	1 335			30	105	95	155	145
					40	125	110	170	155
					50	150	125	190	170
							100 kV		

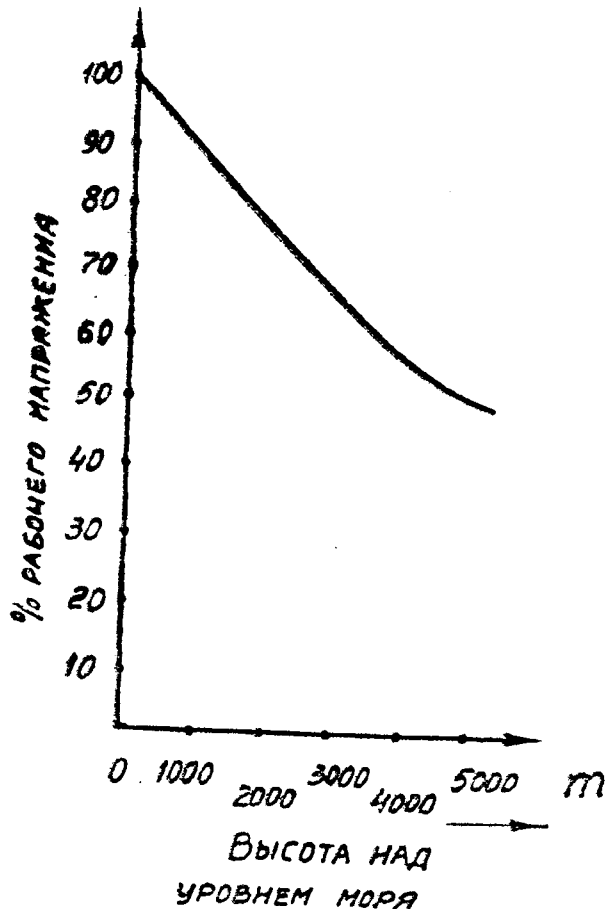


Рис. 2.

метрических давлениях, чем нормальные (25°C , 760 мм рт. ст.), а также при других высотах над уровнем моря должны быть взяты соответствующие поправки, согласно табл. 1.

При больших высотах над уровнем моря необходимо принимать во внимание то, что благодаря пониженной плотности воздуха будет гораздо меньший отвод тепла с поверхностей, и поэтому допустимый перегрев машин и трансформаторов должен быть снижен, т. е. снижается мощность их против нормальных условий.

В высоковольтных установках особый интерес представляет проблема установления наименьших расстояний для проводов. При определении наименьших расстояний для неподвижных

немного выше, чем вычисленное по формулам, так как в противном случае необходимо будет взять или большие расстояния между фазами или землей, или взять большее сечение проводов, что вконец удорожает установку.

Кривая рис. 2 показывает снижение рабочего напряжения в зависимости от высоты над уровнем моря при неизменных расстояниях между проводами и неизменных сечениях. Напряжение над уровнем моря принято в 100%.

Большая разность температур, различная сила ветра и гололедная нагрузка имеют важное значение при установлении наименьших расстояний в высоковольтных установках, но, к сожалению, в настоящее время практических данных об этом очень мало. Табл. 3 дает значения наименьших расстояний для неподвижных и отклоненных проводов для внешних и внутренних установок на уровне моря.

Для определения же требуемых наименьших расстояний при различных высотах необходимо взять из табл. 2 соответственное рабочему напряжению номинальное напряжение (в зависи-

Таблица 3

Относительная плотность воздуха	Поправочн. коэффициент для шаровых разрядник.			
	62,5 mm	125 mm	250 mm	500 mm
0,50	0,547	0,535	0,527	0,519
0,55	0,594	0,583	0,575	0,567
0,60	0,640	0,630	0,623	0,615
0,65	0,686	0,677	0,670	0,663
0,70	0,732	0,724	0,718	0,711
0,75	0,777	0,771	0,766	0,759
0,80	0,821	0,816	0,812	0,807
0,85	0,866	0,862	0,859	0,855
0,90	0,910	0,908	0,906	0,904
0,95	0,956	0,955	0,954	0,952
1,00	1,000	1,000	1,000	1,000
1,05	1,044	1,045	1,046	1,048
1,10	1,090	1,092	1,094	1,096

мости от которого выбирается аппаратура) в зависимости от высоты установки, по которому из табл. 3 и определяются наименьшие расстояния. Так например, для напряжения 33 кВ на высоте 2000 м при температурах от 15 до 35° С требуется согласно табл. 2 номинальное напряжение 45 кВ.

Из табл. 3 для напряжения 45 кВ находим значение наименьшего расстояния между фазами для внутренних устройств $A_i = 44$ мм. При наружных устройствах для неподвижных проводов требуется расстояние $A_F = 1,5 A_i = 660$ мм.

Для проводов линий передач расстояние определяется в зависимости от пролета и тяжения. Обозначение— A_{FS} .

В кабельных установках давление воздуха оказывает малое влияние, так что практически высота прокладки кабельной линии не влияет на допустимое рабочее напряжение. Высота установки над уровнем моря имеет определенное влияние на выбор напряжения передачи, так как кроме ряда условий, рассмотренных выше, при этом еще существенную роль играет транспорт оборудования в горных местностях, а также монтаж его. В заключение автор приходит к выводу, что при больших высотах необходимо ограничиться применением средних и низших напряжений.

К. И. Пяртман

ПИСЬМО В РЕДАКЦИЮ

В № 23—24 за 1931 г. в моей статье: „К пересмотру норм по заземлениям“ вкралась досадная опечатка. На стр. 1344, тринадцатая строка сверху написано: „Когда он прикоснулся к электродам, внезапно раздался глухой стон“. Следует читать: „Подходя к электродам, т. Жуков сделал большой шаг, так что одна нога его очутилась у самой бочки. Внезапно раздался глухой стон“ и т. д.

Фраза „прикоснулся к электродам“ исказила смысл, так как весь интерес описанного случая состоит в том, что удар произошел от шагового напряжения.

Пользуясь случаем, даю ответ на ряд поступивших ко мне запросов: не следует ли, на основании случая на Автозаводе, отвергнуть повышенные величины для шаговых напряжений, предлагаемые комиссией ЦЭС по заземлениям. Отвечая: единственный опыт недостаточен для того, чтобы отвергнуть нормы. Последние базируются на опыте эксплуатации в течение ряда лет по всему СССР. Я лично являюсь сторонником облегчения норм по заземлениям высокого напряжения. Однако приведенный мною случай несомненно доказывает, что и напряжение шага 200 В может при известных условиях оказаться опасным для жизни.

Инж. Роках

АННОТАЦИИ

К. И. ШЕНФЕР, Технические сдвиги в электромашиностроении СССР и капиталистических стран, „Электричество“, № 7, 1932, стр. 584.

В статье описываются последние достижения электромашиностроения в СССР и за границей. В частности в области построения синхронных машин (возрастание мощности, уменьшение размеров и веса, усовершенствования в механической части, уменьшение электрических потерь), трансформаторов (применение принудительного воздушного охлаждения масла, „нерезонирующие“ трансформаторы) и асинхронных машин. Кроме того, в статье уделено внимание усовершенствованиям в электрической тяге (применение компаундных двигателей постоянного тока, схема пуска трамвайного вагона при помощи вольтдобавочной машины, усовершенствования коллекторных однофазных двигателей и последние системы применения бесколлекторных двигателей переменного тока с заменой коллектора ртутным выпрямителем).

Наконец, отмечены успешные результаты опытов применения переменного тока повышенной частоты для целей электросварки.

Б. П. АПАРОВ и В. М. ЛАВРОВ, Современные тенденции в развитии высоковольтных синхронных генераторов и способов их защиты, „Электричество“, № 7, 1932, стр. 393.

Авторы в статье подытоживают современные достижения зарубежной техники в деле построения мощных турбогенераторов высокого напряжения и приводят основные предпосылки, заставляющие стремиться к повышению напряжения на клеммах машины. Описывая несколько уже построенных и работающих машин, авторы разбирают их основные конструктивные особенности с точки зрения тех теоретических предпосылок, которые дали возможность осуществить построение высоковольтных турбогенераторов на 33—36 кВ. На конкретных примерах приводятся экономические преимущества этих машин по сравнению с обычными турбогенераторами. Кроме того, в статье описаны основные мероприятия по защите генераторов от перенапряжений, неизбежных при непосредственном приключении их к сети.

Н. П. ИВАНОВ, Новое в вентиляции турбогенераторов, „Электричество“ № 7, 1932, стр. 400.

Автор описывает в своей статье новый способ вентиляции турбогенераторов без специальных каналов в теле ротора. Эта система в применении ее в крупных машинах с большой аксиальной длиной ротора по целому ряду преимуществ оказывается значительно целесообразней прежних систем вентиляции. В частности она повышает к. п. д. генератора и значительно упрощает производство роторов, а следовательно снижает их стоимость.

А. ЗИЛЬБЕРТАЛЬ, Выбор мощности и количества подстанций для трамваев, „Электричество“, № 7, 1932, стр. 404.

В статье подробно излагается метод теоретического определения мощности и числа ртутных выпрямительных подстанций для трамваев. В основу расчета положена экономика этого вопроса. Статья иллюстрируется рядом цифровых примеров. Автор приходит к выводу, что более экономичные решения получаются при малых мощностях подстанций и большом их числе, причем введение автоматизации подстанций должно послужить стимулом к дальнейшему дроблению подстанций.

Н. ГОНЕК и ГОРОЯН, Современные автоматические регуляторы, „Электричество“ № 7, 1932, стр. 415.

В статье на нескольких примерах показаны меры борьбы с перерегулированием в электрических регуляторах путем применения так называемых „анализирующих“ устройств и проделана попытка анализа их принципа действия.

Л. П. ПОДОЛБСКИЙ, Нужно ли заземлять нейтраль в установках низкого напряжения, „Электричество“, № 7, 1932, стр. 419.

В статье рассматривается вопрос о заземлении нейтрали сетей в 380/220 В с точки зрения безопасности прикосновения человека к проводам. Автор, указывая на недостаточность теоретического анализа этого вопроса и невозможность сделать выводы из статистики несчастных случаев с людьми, считает необходимым произвести специальные опыты с „несчастными случаями“ при помощи специальных замыканий на соответствующие сопротивления. В результате многочисленных опытов такого рода вопрос может получить достаточное обоснование для решения поставленных задач.

А. М. ЗАЛЕССКИЙ, Аналитический расчет установившегося тока короткого замыкания, „Электричество“ № 7, 1932, стр. 421.

Автор излагает в статье новый метод аналитического расчета установившегося тока короткого замыкания, в основу которого положена теория графического расчета Рюденберга-VDE, причем путем некоторого видоизменения функциональной зависимости кривой намагничивания от силы тока возбуждения автор выводит весьма простой и в то же время точный метод подсчетов.

И. МАРКОВИЧ, Графический способ определения изменения токов короткого замыкания в течение переходного процесса, „Электричество“, № 7, 1932, стр. 425.

В статье изложено описание графического способа определения изменения токов короткого замыкания в течение переходного процесса и приведено его теоретическое обоснование. Для применения метода на практике необходимо иметь основные параметры генераторов и линии передачи.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ: Е. С. Аватков, В. И. Вейд, М. Н. Грановская, Я. А. Климовицкий, И. С. Палицын, М. И. Рубинштейн, Н. А. Сазонов, М. А. Шателен, Я. Н. Шильрейн
СТАРШИЙ РЕДАКТОР Я. А. Климовицкий

ОПТИ — ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

Техред Е. Чебышева

ОНТИ

КНИГОЦЕНТР

ОНТИ

ПРИНИМАЕТСЯ ПОДПИСКА на 1932 год
НА ЖУРНАЛЫ

„ВЕСТНИК ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ“

Ежемесячный орган Всесоюзного электротехнического объединения ВЭО

ЗАДАЧИ ЖУРНАЛА: достижения советской электропромышленности сильного тока, описание новых типов выпускаемых изделий с их технической характеристикой, результаты лабораторных испытаний, виды и условия применения, опыт эксплуатации и качество электротехнических изделий. Особый отдел—электродвигательные приводы к производственным станкам и машинам. Отделы плано-экономический.

ЖУРНАЛ РАССЧИТАН на инженеров, техников, квалифицированных рабочих и студентов вузов.

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:

на год 10 р. — к.,
на 6 мес. 5 р. — к.,
на 3 мес. 2 р. 50 к.,
Отдельный номер 1 р. — к.

Льготная при коллективной подписке не менее 10 экз.

на год 9 р. — к.,
на 6 мес. 4 р. 50 к.

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ЖУРНАЛ ЭНЕРГОЦЕНТРА

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

ГОД ИЗДАНИЯ 3-й

ГОД ИЗДАНИЯ 3-й

ПРОГРАММА ЖУРНАЛА: Описание проектов новых станций и сооружений. Освещение опыта эксплуатации станций и их отдельных частей. Вопросы организации строительства. Вопросы планирования электростроительства и распределения энергии. Разбор новых проблем эксплуатации и рационализации энергохозяйства. Эксплуатация высоковольтных сетей и электропередач. Параллельная работа станций. Освещение достижений Запада в вопросах электростроительства.

Журнал рассчитан на инженера, техника и квалифицированного рабочего станции, учащихся вузов и вузов, библиотеки, научно-исследовательские и проектирующие институты.

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:

на год 15 р. — к.,
на 6 мес. 7 р. 50 к.,
на 3 мес. 3 р. 75 к.,
Отдельный номер 1 р. 50 к.

Льготная при коллективной подписке не менее 10 экз.

на год 8 р. — к.,
на 6 мес. 4 р. — к.,
на 3 мес. 2 р. — к.

Подписка принимается во всех отделениях и магазинах Книгоцентра ОГИЗа, его уполномоченными и на почте.

О Н Т И

КНИГОЦЕНТР

ПР

2 ГОД

„С
РЕКОРАЯ
УКА“

И

ЖУРНАЛ

(Издается по инициативе ЦК ВКП(б) о техпропаганде)

- „СО-РЕ-НА“ выходит полнотыпными книжками 10 раз в год.
- „СО-РЕ-НА“ издается органом Научно-исследовательского сектора и сектора технической пропаганды ВСНХ СССР.
- „СО-РЕ-НА“ рассчитан на научных работников, инженеров, хозяйственников, преподавателей и студентов вузов и втузов.
- „СО-РЕ-НА“ издается при ближайшем участии наиболее крупных ученых, инженеров, хозяйственников и экономистов СССР. В журнале будут также даваться статьи выдающихся иностранных ученых.
- „СО-РЕ-НА“ помещает статьи руководящего характера, статьи по внедрению диалектического материализма в естественные и технические науки, теоретические статьи по всем общим дисциплинам, статьи по боевым вопросам современной техники, по организации научно-исследовательского и технического труда и т. п.
- „СО-РЕ-НА“ освещает главные основные проблемы и достижения зарубежной научной и технической мысли.
- „СО-РЕ-НА“ содержит помимо отдела статей, также отделы: Обзоры и рефераты. „Работа научно-исследовательских институтов СССР“. „Библиография русская и иностранная“. „Хроника СССР и заграничи“, деятельность НИС и техпропа ВСНХ.

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:

на год—15 р., на 6 мес.—7 р. 50 к. Отдельный номер—2 р.

НОВЫЙ ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ЖУРНАЛ

„ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ“

(МЕТОДИКА и ПРАКТИКА)

Орган сентора производственно-технической пропаганды ВСНХ СССР

ЖУРНАЛ СТАВЛТ СВОЕЙ ЗАДАЧЕЙ:

Дать информационным органам нашей промышленности правильную установку работы, в соответствии с директивами партии о техпропаганде.

Дать инструктивный и методический материал по линии организации работы технических библиотек, групп технической информации и ячеек обмена опытом.

Организовать на страницах журнала обмен опытом в области этой работы.

Поставить на широкое обсуждение спорные вопросы и новые предложения.

Информировать читателя о формах и методах технической пропаганды на заводе.

Освещать новейшие советские и иностранные издания по вопросам технико-информационной работы. Держать читателя в курсе техинформации, проводимой в отдельных отраслях промышленности.

ЖУРНАЛ РАССЧИТАН

на работников органов технической информации, групп по обмену опытом и работников технических библиотек. Журнал представляет также интерес и для инж.-техн. работников нашей промышленности.

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:

на год 15 р.
на 6 мес. 7 р. 50 к.
на 3 мес. 3 р. 75 к.

Цена отдельного номера—1 р. 50 к.

Подписка принимается во всех отделениях и магазинах Книгоцентра ОГИЗа, его уполномоченными и на почте