

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1941



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

1

## СОДЕРЖАНИЕ

|   | Стр.      |
|---|-----------|
| Приветствия товарищу И. В. Сталину и товарищу В. М. Молотову, принятые на торжественном заседании, посвященном юбилею журнала „Электричество“ . . . . . | 1—2       |
| <i>Летков А. И.</i> — Ленинско-сталинский план электрификации СССР . . . . .  | 3         |
| <i>Бергер А. Я.</i> — Недостатки электротехнического образования и необходимые мероприятия . . . . .  | 5         |
| <i>Бабат Г. И.</i> — Привлечь ведущих заводских инженеров к работе высшей школы . . . . .   | 6         |
| <i>Хрущев В. М.</i> — Главная задача высшей школы . . . . .   | 7         |
| <i>Каменский М. Д.</i> — О профиле инженера-электрика и многопредметности . . . . .   | 8         |
| <i>Брагин С. М.</i> — Инженеру-электрику нужно знать не только электрические машины . . . . .   | 9         |
| <i>Степанов В. Н.</i> — Укреплять лаборатории, развивать научную работу во втузах . . . . .   | 10        |
| <i>Бертинов А. И.</i> — УстраниТЬ шаблон в учебном и дипломном проектировании . . . . .   | 10        |
| <i>Привезенцев В. А.</i> — Усилить преподавание специальных дисциплин . . . . .   | 11        |
| <i>Никитин В. П.</i> — Динамическое равновесие систем с непрерывно меняющейся нагрузкой . . . . .   | 12        |
| <i>Линниченко Н. Н.</i> — Компактная высоковольтная аппаратура . . . . .  | 16        |
| <i>Кронгауз Ю. С.</i> — Мощные трансформаторы с регулируемым под нагрузкой напряжением . . . . .  | 22        |
| <i>Эсибян М. А.</i> — Переходные процессы при торможении противотоком асинхронных двигателей . . . . .  | 27        |
| <i>Чернин А. Б.</i> — Действие дистанционной защиты импедансного типа при двойных замыканиях на землю в компенсированной сети . . . . .                 | 31        |
| <i>Атабеков Г. И. и Богатырев О. М.</i> — Влияние вольтовых дуг на замер реактивных реле . . . . .  | 37        |
| <i>Привезенцев В. А. и Минц С. Б.</i> — О пересмотре стандарта на силовые кабели . . . . .  | 42        |
| <i>Брагин С. М.</i> — Образование пустот в кабеле . . . . .   | 44        |
| <i>Сыромятников И. А.</i> — Новый метод определения сопротивления обратной последовательности синхронных генераторов . . . . .                          | 50        |
| <i>Нитусов Е. В.</i> — О переходных процессах в машинах постоянного тока . . . . .  | 51        |
| <i>Нестеренко А. Д.</i> — Ступенчатые потенциометры для поверки стрелочных приборов . . . . .   | 53        |
| <i>Туманишвили Д. Г.</i> — Нагрев трансформаторов прямыми лучами солнца на открытых подстанциях . . . . .   | 55        |
| <i>Вайнберг А. Я.</i> — О точных измерениях весьма малых сопротивлений неуравновешенным мостом Матиссена . . . . .                                      | 57        |
| <i>Веселый В. А. и Фертик С. М.</i> — Четырехлучевой катодный осциллограф с врачающейся в вакууме кассетой . . . . .                                    | 59        |
| <i>Шаталов А. С.</i> — Графическое определение амплитуды первой гармоники тока по кривой намагничивания . . . . .                                       | 62        |
| <i>Лебедев В. Н.</i> — Определение постоянной времени экспоненциальной функции при неизвестных начальном и конечном ее значениях . . . . .              | 63        |
| Юбилейные дни журнала „Электричество“ в 1940 г. . . . .   | 64        |
| <i>Будницкий И. М.</i> — 15 лет Шатурской гидроэлектростанции им. Ленина . . . . .  | 65        |
| <i>Ракоши З. И.</i> — Роль сельской электрификации в военном хозяйстве капиталистических стран . . . . .  | 67        |
| <b>БИБЛИОГРАФИЯ . . . . .</b>   | <b>69</b> |
| <b>РЕФЕРАТЫ . . . . .</b>   | <b>71</b> |

ЖУРНАЛ  
ОСНОВАН  
В 1880 Г.

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1

1941

ЯНВАРЬ

ОРГАН АКАДЕМИИ НАУК СССР И ВСЕСОЮЗНОГО НАУЧНОГО ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА  
ЭНЕРГЕТИКИ

Адрес редакции: Москва, Бол. Калужская, дом 67, 1 этаж, комн. 144, тел. В 2-45-63

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

ЦЕНТРАЛЬНЫЙ КОМИТЕТ ВКП(б)

Товарищу Иосифу Виссарионовичу  
СТАЛИНУ

Дорогой Иосиф Виссарионович!

Ученые и инженеры электротехники, собравшиеся на торжественное заседание, посвященное 60-летию старейшего русского научного электротехнического журнала „Электричество“, шлют Вам, вождю, учителю и другу трудающимся всего мира, пламенный большевистский привет.

Мудрая политика Коммунистической партии и Советского Правительства обеспечила замечательные успехи во всех областях социалистического строительства и внешней политики СССР, обеспечила народам СССР возможность пользоваться благами мирной жизни и созидательного труда, в то время когда за рубежами разрастается с огромной силой пламя второй империалистической войны.

Велики успехи, достигнутые в области народного хозяйства и укрепления обороны мощи СССР. В сталинских пятилетках, поднявших нашу страну на уровень передовой индустриальной державы и сделавших ее вместе с тем страной самого крупного в мире социалистического сельского хозяйства, электрификации принадлежит важнейшая роль.

Отмечая 60-летие журнала „Электричество“, отражающего рост и достижения русской электротехнической мысли, мы отмечаем вместе с тем достижения и рост электротехники и электрификации в нашей стране.

Пионеры русской электротехники и деятели науки об электричестве Чиколев, Яблочкин, Лодыгин, Лачинов, Усагин, Столетов, Попов, Доливо-Добровольский, Хвольсон, Розинг и другие своими работами определили развитие мировой электротехнической мысли в самых разнообразных направлениях — в области электрического освещения, передачи и распределения электроэнергии, радиотелеграфии и т. д.

Однако блестящие достижения русских ученых изобретателей, электротехников не получали реализации в царской России.

Великая Октябрьская Социалистическая революция поставила на службу социализму могучую силу электричества. Под непосредственным личным руководством Ленина был разработан в 1920 году знаменитый план ГОЭЛРО, положенный партией в основу социалистического строительства. Гениальный лозунг Ленина „Коммунизм есть Советская власть плюс электрификация всей страны“ вдохновил широкие массы рабочих, крестьян и интеллигенции на выполнение великих планов.

Вместе с Лениным Вы, Иосиф Виссарионович, высоко оценили значение электрификации в деле построения коммунизма и отстояли план ГОЭЛРО в борьбе против яростных атак со стороны врагов партии и рабочего класса.

*В результате сталинских пятилеток план ГОЭЛРО ныне далеко перевыполнен.*

*По производству электроэнергии СССР стоит на одном из первых мест в мире.*

*Всех этих достижений строительства социализма трудящиеся СССР добились под Вашим мудрым водительством, Иосиф Виссарионович.*

*В сложной обстановке капиталистического окружения и второй империалистической войны, как никогда, выросли задачи всенародного укрепления оборонной мощи СССР.*

*Перед советскими электротехниками стоит задача еще сильнее развивать творческую, изобретательскую мысль, укреплять вооруженность и могущество социалистической родины.*

*Да здравствует Всесоюзная Коммунистическая Партия большевиков — передовой отряд трудящихся Советского Союза!*

*Да здравствует наш любимый товарищ Сталин!*

---

**СОВЕТ НАРОДНЫХ КОМИССАРОВ СССР**

**Товарищу Вячеславу Михайловичу  
МОЛОТОВУ**

*Дорогой Вячеслав Михайлович!*

*Собравшись в день 60-летия со дня создания первого русского электротехнического журнала „Электричество“, научные работники, инженеры, техники и стахановцы электростанций и электропромышленности шлют Вам, ближайшему соратнику великого Сталина, главе Советского Правительства — свой горячий привет.*

*Оглядывая путь, пройденный электротехникой и энергетикой нашей великой родины, мы видим в нем отражение тех всемирно-исторических успехов, которые сделала вся наша страна под водительством большевистской партии и Советского Правительства. Под этим мудрым руководством в кратчайший исторический срок выполнен и перевыполнен гениальный ленинский план электрификации страны — план ГОЭЛРО.*

*В Вашем лице, дорогой товарищ Молотов, приветствуем мы верного проводника великих идей Ленина и Сталина, стойкого борца за дело укрепления нашей родины, верного защитника ее интересов.*

*Мы, один из отрядов советской интеллигенции, обещаем приложить все свои силы для достижения дальнейших успехов в деле энергетического вооружения народного хозяйства, в деле выполнения исторических решений XVIII съезда Партии и укрепления оборонной мощи нашей родины.*

*Да здравствует Советское Правительство и его глава товарищ Вячеслав Михайлович Молотов!*

*Да здравствует наш родной Сталин!*

---

Приветствия товарищу И. В. Сталину и товарищу В. М. Молотову приняты на торжественном заседании, посвященном 60-летию журнала „Электричество“, 23 ноября 1940 г. в Московском Доме Ученых Академии Наук СССР.

# Ленинско-сталинский план электрификации СССР

А. И. ЛЕТКОВ

Народный комиссар электростанций СССР

22 декабря 1920 года открылся VIII Всероссийский Съезд Советов, одобравший план электрификации страны, разработанный по инициативе Владимира Ильича Ленина государственной комиссией по электрификации России — ГОЭЛРО.

Вопрос о составлении единого государственного плана восстановления и развития народного хозяйства был поставлен В. И. Лениным еще в апреле 1918 года. Излагая принципы будущего плана, Ленин предлагал обратить особое внимание на электрификацию промышленности и транспорта и применение электричества в земледелии, на использование местных видов топлива и водных сил страны для получения электрической энергии.

К своему гениальному замыслу о составлении государственного плана развития народного хозяйства на базе электрификации Ленин вновь возвращается через два года. В январе 1920 года Владимир Ильич писал: «Нельзя ли добавить план не технический (это, конечно, дело многих и не скромительное), а политический или государственный, т. е. задание пролетариату?

Примерно: в 10 (5?) лет построим 20—30 (30—50?) станций, чтобы всю страну усеять центрами на 400 (или 200, если не осилим больше) верст радиуса; на торфе, на воде, на сланце, на угле, на нефти (при мерно перебрать Россию всю, с грубым приближением). Начнем де сейчас закупку необходимых машин и моделей. Через 10 (20?) лет сделаем Россию «электрической» (Ленин, т. XXIX, стр. 432).

Это письмо Ленина послужило основой для разработки плана электрификации страны, плана ГОЭЛРО.

Ленин и Сталин придавали исключительное значение плану ГОЭЛРО — плану социалистического переустройства отсталой России в передовую индустриальную страну.

На VIII Съезде Советов В. И. Ленин говорил о плане ГОЭЛРО: «На мой взгляд, это — наша вторая программа партии».

Товарищ Сталин в письме к В. И. Ленину писал по поводу плана ГОЭЛРО: «Мастерский набросок действительно единого и действительно государственного хозяйственного плана без кавычек. Единственная в наше время марксистская попытка подведения под советскую надстройку хозяйственно-отсталой России действительно реальной и единственно возможной при нынешних условиях технически-производственной базы».

Для осуществления программы электрификации страны нужна была новая энергетическая база. В 1913 году в России было произведено всего 1,9 миллиарда киловатт-часов электроэнергии, а мощность электростанций составляла лишь 1098 тысяч киловатт. По производству электроэнергии Россия занимала пятнадцатое место в мире.

План ГОЭЛРО наметил создание новой энергетической базы. Предусматривалось строительство 30 новых районных электростанций общей мощ-

ностью в 1750 тысяч киловатт (десять гидроэлектростанций и двадцать тепловых станций на местном топливе). Была намечена также реконструкция некоторых действующих электростанций с включением их в районную сеть.

Ленинско-сталинский план электрификации страны встретил яростное сопротивление со стороны врагов народа. Оппортунисты всех мастей пытались фальсифицировать ленинско-сталинское определение электрификации, выхолащивая из понятия электрификации то глубокое содержание, которое в него вкладывал В. И. Ленин. Враги народа всячески препятствовали практическому осуществлению плана ГОЭЛРО.

Товарищ Сталин разоблачил попытки фальсификации ленинских принципов электрификации. Выступая на Пленуме ЦК ВКП(б) в ноябре 1928 года, товарищ Сталин, цитируя Ленина, говорил:

«...под электрификацией страны Ленин понимает не изолированное построение отдельных электростанций, а постепенный «перевод хозяйства страны, в том числе и земледелия», на новую техническую базу, на техническую базу современного крупного производства», связанного так или иначе, прямо или косвенно, с делом электрификации».

Прошло двадцать лет. Под руководством товарища Сталина реализован ленинский план ГОЭЛРО, успешно осуществлена программа электрификации страны. Еще к пятнадцатилетию ГОЭЛРО план был перевыполнен почти в 2½ раза.

К началу третьей пятилетки мощность всех электростанций достигла 8240 тысяч киловатт — в 7,5 раза больше, чем было в 1913 году.

За годы сталинских пятилеток созданы крупные энергетические системы в важнейших промышленных районах. Далеко превзойден первоначальный план ГОЭЛРО. Вместо намеченных 17 энергосистем возникло 40 районных энергетических центров. Созданы новые энергетические системы в Приднепровье, Донбассе, на Урале, в Казахстане, Грузии, Армении, Кузбассе и в других районах.

Плановое хозяйство и единые энергосистемы позволили резко повысить использование установленной мощности электростанций. Это обеспечило быстрый рост производства электроэнергии. Достаточно сказать, что в 1937 году было выработано 36,4 миллиарда киловатт-часов — в 18,5 раза больше, чем в 1913 году.

По производству электроэнергии наша страна с 1935 года занимает третье место в мире, уступая лишь США и Германии.

Социалистическая промышленность в основном электрифицирована. На базе электроэнергии возникли новые способы производства алюминия, цинка и т. д. На сотнях километров железнодорожных путей применяется электрическая тяга. Электричество прочно вошло в быт населения нашей страны.

\* Курсив товарища Сталина.

Важнейшее достижение советской энергетики — широкое использование для выработки электроэнергии местных низкосортных топлив и энергии многочисленных рек страны. В 1913 году районные электростанции работали на высокосортном топливе: на нефти и донецком угле. Теперь 80 процентов энергии производится на местном топливе и на гидростанциях.

Наметки плана ГОЭЛРО о строительстве гидростанций превзойдены вдвое. Построены гидростанции на Волхове, Днепре, Волге, Свири, Ниве, Рионе, Чирчике и многих других реках страны.

Беспрерывно повышается технический и культурный уровень эксплоатации электростанций и сетей. Работники электростанций с каждым годом улучшают технику эксплоатации оборудования. Если в 1913 году районные электростанции расходовали для производства одного киловатт-часа 1,06 килограмма условного топлива, то в нынешнем году расходуют только 0,594 килограмма.

По этому важнейшему технико-экономическому показателю электростанции Советского Союза достигли уровня электростанций главных капиталистических стран. В 1939 году на электростанциях общего пользования в США расходовалось на производство одного киловатт-часа 0,621 килограмма топлива, в Англии — 0,67 килограмма, а на районных электростанциях СССР — 0,605. Передовые электростанции добились еще лучших показателей. Каширская ГРЭС расходует 0,524 килограмма топлива на один киловатт-час. Шатурская ГРЭС — 0,547, Зуевская ГРЭС — 0,528.

За годы сталинских пятилеток важной отраслью народного хозяйства стала теплофикация. Преимущества комбинированного производства тепловой электрической энергии и централизованного снабжения обеспечили теплофикации быстрое и всестороннее развитие. К началу 1939 года мощность теплоэлектроцентралей Советского Союза достигла значительной величины. Только районными теплоэлектроцентралями в прошлом году отпущено промышленности и коммунальному хозяйству городов свыше 9 млн. мегакалорий. Теплофикация ежегодно экономит стране около 1,5 миллиона тонн условного топлива.

Самым ценным капиталом советской энергетики являются ее кадры, накопившие опыт строительства и эксплоатации электростанций. На электростанциях выросли сотни и тысячи прекрасных работников-стахановцев и ударников.

Успехи нашего энергетического хозяйства, досрочное выполнение плана ГОЭЛРО достигнуты благодаря повседневному руководству делом электростанций.

трификации со стороны Центрального Комитета ВКП(б), советского правительства, лично товарища Сталина.

Товарищ Сталин постоянно заботится о советской энергетике, рассматривает проекты важнейших сооружений, помогает строительству электростанций, своевременно исправляет допущенные ошибки и своими мудрыми указаниями направляет нашу работу.

Товарищ Сталин на XVIII съезде партии поставил перед всей страной грандиозную задачу — в 10—15 лет догнать и перегнать главные капиталистические страны также и в экономическом отношении, т. е. по уровню производства важнейшей продукции на душу населения.

В 1937 г. в СССР на душу населения произвилось 215 киловатт-часов электроэнергии, а в Англии — 608, в Германии — 735, в США — 1160 киловатт-часов. Огромную работу предстоит провести советским энергетикам, чтобы в минимальные сроки выполнить сталинское задание по увеличению производства электроэнергии.

XVIII съезд ВКП(б) потребовал: «В области электрохозяйства ликвидировать имеющуюся частичную диспропорцию между большим ростом промышленности и недостаточным увеличением мощностей электростанций с тем, чтобы рост электростанций опережал не только рост промышленности, но и обеспечивал создание значительных резервов электрических мощностей».

Исторические решения XVIII съезда — боевая программа действий для всех работников электростанций.

Работники электростанций и сетей должны в предстоящем году добиться дальнейшего увеличения производства электрической и тепловой энергии. Необходимо создать резервы электрических мощностей во всех крупнейших промышленных районах. Это требует напряженной работы эксплуатационников и особенно строителей новых электростанций и сетей.

Новый 1941 год должен стать годом борьбы за дальнейшее повышение культуры производства на электростанциях, за снижение удельных расходов топлива и электроэнергии, за повышение производительности труда и экономичную работу предприятий.

Повседневное руководство Центрального Комитета партии, лично товарища Сталина электрификацией страны — порука тому, что трудящиеся СССР добьются на этом важнейшем участке строительства коммунизма дальнейших успехов.

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ — НА ВЫСШУЮ СТУПЕНЬ

## ОТ РЕДАКЦИИ

В помещаемых ниже в порядке обсуждения статьях проф. А. Я. Бергер, инж. Г. И. Бабат, акад. В. М. Хрущова, проф. М. Д. Каменского, проф. С. М. Брагина, проф. В. Н. Степанова, доц. А. И. Бертинова и доц. В. А. Привезенцева рассматриваются некоторые важные вопросы, связанные с задачей улучшения высшего электротехнического образования в СССР. Имея в виду огромное значение дела подготовки кадров специалистов-электротехников для электропромышленности и электростанций и всего народного хозяйства СССР, редакция ставит своей задачей и в дальнейшем освещать в журнале „Электричество“ наиболее актуальные вопросы электротехнического образования и приглашает работников высшей школы, ученых и инженеров принять в этом разделе журнала активное участие.

## Недостатки электротехнического образования и необходимые мероприятия

Проф. А. Я. БЕРГЕР

Ленинградский политехнический институт им. Каланина

Комитетом по делам высшей школы при Совнаркоме Союза ССР проделана плодотворная работа по упорядочению учебного процесса во втузах вообще и в области электротехнического образования, в частности. Однако и сейчас электротехническое образование не лишено еще ряда существенных дефектов и в отношении профиля, и в отношении самого учебного процесса.

**О профиле инженера-электрика.** Наши электротехнические втузы (включая, понятно, сюда и соответствующие факультеты многофакультетных вузов) выпускают инженера-электрика для обслуживания электропромышленности, электростанций и их сетей, для тяги, привода и т. п.

Учебный план — практически одинаковый до 5-го курса. Отличия — в предметах 5-го курса и в дипломном проекте.

Выпускаемые нами специалисты не плохо подготовлены в области соответственного расчета и исследования, но крайне слабо в области монтажа, эксплоатации, производства. Так например, кончающие по электрическим машинам весьма недостаточно подготовлены в области производства электрических машин, между тем как в цехи требуется инженеров больше, чем в расчетные и исследовательские бюро. Неважно обстоит дело и с подготовкой по монтажу и конструированию электрических машин. Вероятно, аналогичное имеет место и по другим электротехническим специализациям.

Если говорить о конструкции только электрических машин, то достаточное представление об этом имеют только электромашиностроители, а ведь машина — основной элемент электрической цепи, и знание машин для инженеров-электриков всех специальностей — равнозначно знанию основ электротехнической науки.

Причины такого положения следующие:

- 1) недостаточность знаний у самих преподавателей вузов в указанных областях;
- 2) малый процент привлекаемых во втузы для преподавания указанных областей специалистов с производства;
- 3) недооценка роли конкретного знания вещей за счет гипертрофии схем, диаграмм и т. п.;

4) недостаточная пропаганда роли конструктора и цехового инженера;

5) недостаток книг по технологиям и организации производства монтажа и эксплуатации электрических станций и электропромышленности.

Мероприятия по устранению недостатков в профиле инженера-электрика направляются таким образом сами собой.

**О многопредметности, последовательности курсов и перегрузке студентов.** В свое время на электротехнических факультетах изучались только две специальные электротехнические дисциплины, а именно: электрические машины и электротехнические установки.

Это было, правда, более 20 лет назад.

Развитие электротехники привело к появлению ряда самостоятельных дисциплин, отпочковавшихся в основном либо от курса электрических машин, либо от разбивки второго курса (электротехнические установки) на ряд курсов и подкурсов.

Появились следующие отдельные курсы:

1. Электрические станции. 2. Электропривод — общий курс и ряд специальных курсов. 3. Электрическая тяга. 4. Токи короткого замыкания. 5. Устойчивость параллельной работы электросистем. 6. Техника высокого напряжения. 7. Электротехнические материалы. 8. Релейная защита и т. д.

Исторически этот процесс образования отдельных курсов был весьма плодотворен — и в этом его оправдание.

Однако, если обратиться к содержанию указанных дисциплин, к книгам разных авторов по этим дисциплинам, то беспристрастный читатель легко установит, что они во многом повторяют прежде всего излагаемое в курсе электрических машин и что они в значительной мере перекрывают друг друга. Часть материала действительно не излагается в курсе электрических машин, но должна там излагаться, так как этот курс основной, обязательный для всех электриков.

Далее. Так как курсов появилось очень много, то некоторым студентам читаются одни из вышеуказанных курсов, другим — другие, между тем как современная техника настоятельно требует от инженера-электрика знания в определенном объеме почти всех, если не всех этих дисциплин.

Увеличение числа курсов, раздущих по объему с соответственным числом часов, привело не только

к многопредметности, но и по необходимости к нарушению необходимой последовательности. Чтобы начать раньше электропривод, машины начинаются до сдачи экзамена по измерениям, машины переменного тока — до сдачи основ переменного тока, курс электропривода — даже до чтения асинхронных машин, техника высоких напряжений — до сдачи синхронных машин, токи короткого замыкания — даже до слушания этого раздела в курсе машин и т. д.

Отпочкование от курса электрических машин ряда курсов было, повторю, плодотворно, вызывалось развитием техники, но на сегодня эта мелкая разбивка не соответствует уже требованиям, предъявляемым к инженеру современной техникой. Изучить все указанные курсы в их настоящем виде студент не в состоянии, а знать их в известном объеме он должен. Где же выход?

Не пора ли вместо этого обилия самостоятельных курсов иметь наряду с курсом электрических машин один курс под названием, скажем, «Электротехнические установки», но с другим содержанием, соответствующим уровню техники сегодняшнего дня.

Такой единый курс надо, понятно, создать, и коллективными усилиями он может быть создан. Те основы, которые необходимо будет дать студентам в этом едином курсе, должны быть известны (и, наверное, известны) лекторам отдельных курсов. Читаться он должен на 4-м курсе, а на 5-м должны быть даны полностью все необходимые соответственные добавления уже в зависимости от специализации. Исчезнет многопредметность, и в значительной степени уменьшится перегрузка студентов.

Вместе с тем введение единого курса «Электротехнических установок» вместо 8—10 курсов даст возможность несколько (не намного) расширить курс электрических машин и изучить конструкцию и технологию электрических машин всем электрикам в минимально необходимом (хотя бы для знания ремонта машин) объеме и тем самым ликвидировать положение, когда наш студент мыслит только схемами, диаграммами и т. п., забывая про реальные вещи.

Сказанное об электротехническом образовании имеет в виду гражданские втузы, но и военные втузы не лишены тех же недостатков.

Мною затронуты намеренно немногие вопросы с тем, чтобы ясна была задача. Разумеется, что разрешение этих вопросов позволит рационализировать весь учебный процесс и упорядочить условия учебы студента при максимальной эффективности его труда и максимальном удовлетворении нужд энергохозяйства и обороны социалистической родины.

Для улучшения положения проф. Бергер предлагает создать единый курс «Электротехнических установок». Такое мероприятие мне кажется нецелесообразным. Простым пересмотром учебных планов и программ существующих курсов можно избежать ненужных повторений и неправильного распределения материала.

Электротехника наших дней весьма дифференцирована и усложнена по сравнению с электротехникой тех лет, когда существовал такой единый курс «Электротехнических установок».

Очень трудно найти сейчас специалистов, которые были бы одинаково сильны во всех разветвлениях современной электротехники, которые имели бы одинаково глубокие познания в области, например, распределения электроэнергии и в области электровакуумных приборов или, скажем, в области измерительной техники и электропривода.

Следовательно, курс «Электротехнических установок» придется бы разделить между несколькими лекторами, и, таким образом, введение этого единого курса по существу свелось бы лишь к изменению заглавия излагаемого материала.

Основная причина недостаточной квалификации молодых специалистов-электротехников — это низкий уровень знаний в области практических дисциплин у преподавателей вузов. В этом повинна, я считаю, в известной мере штатная система.

Штатная система, играющая большую положительную роль в деле упорядочения работы кафедр теоретических дисциплин, для кафедр практических дисциплин, приносит немало затруднений. Она приводит к положению, когда доценты и профессора совершенно отрываются от основных заводов своей специальности. Получается, что промышленность сама по себе, а институтская наука, отставшая от успехов промышленности, также сама по себе.

Штатные работники кафедр читают курсы практических дисциплин на основании литературных источников, не имея собственного опыта практической работы. Штатный работник кафедры, чтобы иметь полную нагрузку, должен часто читать ряд разнохарактерных специальных курсов. Такое совмещение, естественно, снижает качество преподавания.

Существующие на кафедрах лимиты на почасовую оплату позволяют привлекать специалистов с производства в очень ограниченных размерах.

Это положение может быть изменено путем введения (для кафедр практических дисциплин) званий сверхштатных профессоров и сверхштатных доцентов (приват-доцентов).

Загрузка сверхштатного лектора может не превышать сотни или даже нескольких десятков часов в год.

Однако введение сверхштатных званий позволит объединить в кафедрах практических дисциплин ведущих работников заводов и научно-исследовательских институтов, сделать учебные кафедры вузов передовым отрядом советской техники.

Необходимо также изменить систему подготовки преподавательских кадров практических дисциплин.

В настоящее время аспирантура практических кафедр (электрических машин или аппаратостроения, например) нередко построена аналогично аспирантуре теоретических кафедр (теоретической электротехники, например). Рабочее место аспиранта — это

## Привлечь ведущих заводских инженеров к работе высшей школы

Инж. Г. И. БАБАТ  
Ленинградский завод „Светлана“

Проф. Бергер затронул весьма важный вопрос — о недостаточной квалификации молодых инженеров, выпускаемых нашими электротехническими вузами — в области производства, монтажа и эксплуатации.

институт, где он может погружаться лишь книжными знаниями и заниматься исследованиями в учебных лабораториях.

Ясно, что таким путем будущий преподаватель не может приобрести высокой квалификации в области производства, монтажа и эксплуатации.

Если у аспиранта и имелся производственный стаж, то полный отрыв от производства при начале занятий в аспирантуре в значительной мере обесценивает запас знаний, приобретенных во время этого стажа.

Повысить качество подготовки лекторов практических дисциплин можно, организовав аспирантуру соответствующих кафедр по иному, чем теперь принципу.

Рабочее место аспиранта кафедры какой-либо практической дисциплины должно быть в заводской лаборатории или в цехе. Институтская кафедра должна только консультировать и направлять работу аспиранта. Комитет по делам высшей школы совместно с наркоматами должен составить список заводов, которые будут служить базой для подготовки преподавательских кадров практических дисциплин. Организационные формы совместной работы вузов и заводов, конечно, легко могут быть найдены.

Большое количество высококачественных диссертационных работ, выполняемых уже в настоящее время заводскими работниками, показывает, что предлагаемый путь подготовки преподавательских кадров практических дисциплин является правильным.

## Главная задача высшей школы

Акад. В. М. ХРУЩОВ

Харьковский электротехнический институт

Я не могу согласиться с мнением проф. Бергера о том, что в электротехнических вузах должно быть только два специальных курса: 1) электрические машины и 2) электротехнические установки, как это имело место раньше.

Подобная система образования относится к очень старому времени и к тем учебным заведениям, где не было электротехнических факультетов, а были лишь специализации по электротехнике на механических факультетах. В тех же учебных заведениях, где электротехнические факультеты были, читались самостоятельные курсы электрических станций, электрических сетей, электрических линий передач и т. д. Наука и техника с того времени столь далеко шагнули вперед, что, конечно, возвращение к подобной системе, не удовлетворявшей даже промышленности 1920 г., никак нельзя признать рациональным.

Техника шагает семимильными шагами вперед, в любой отрасли технической науки сейчас непрерывно возникают новые ветви. Единственный способ дать полноценного инженера — это специализация его образования; только при таких условиях молодой инженер, попадая на работу, будет действительно подготовлен к тому, чтобы понимать производственный язык на заводе или электростанции и включиться немедленно в активную работу. В противном случае ему неизбежно придется долгое время пополнять свои знания в специальных вопросах и он будет чувствовать себя в совершенной чуждой ему обстановке. Разумеется, непременным условием правильной постановки образования,

обеспечивающей полноценного инженера, является серьезная физико-математическая база.

Я вижу недостаток настоящей системы обучения не в том, на что указывает проф. Бергер. Действующая сейчас система обучения по существу приспособлена к таким высшим учебным заведениям, как университет, для технических же вузов она мало пригодна. Отличительная особенность ее — это преобладание пассивных способов обучения — громадное количество лекций и крайне малый объем проектирования. Роль же последнего в образовании инженера чрезвычайно велика.

В те годы, когда я учился, проектирование отнимало у студентов наибольшее количество времени, и за пять лет прохождения курса мной было сделано свыше 90 листов чертежей. Разумеется, такой объем графической работы для электрика совершенно не нужен, однако то, что сейчас курсовое проектирование по специальным дисциплинам в учебных планах фактически отсутствует, представляет вопиющее явление.

Я никак не могу также согласиться с мнением проф. Бергера о том, что недостаточность развития курсов эксплуатации и монтажа составляет существенный пробел электротехнического образования. Главная задача высшей школы заключается не в том, чтобы сообщить будущему инженеру все те сведения, которые ему понадобятся в дальнейшем в его деятельности; это невозможно потому, что запас этих сведений столь велик, что в пятилетний срок обучения этого сделать нельзя. Главная задача высшей школы заключается в том, чтобы дать учащемуся надлежащее развитие и научить его самостоятельно работать. Только такой специалист будет способен итии ногу в ногу с быстро развивающейся техникой, только такой специалист сможет сам принять участие в развитии этой техники. Если высшая школа не дала оканчивающему соответствующего развития, если она не развила в нем способности к самостоятельной работе, то она своей задачи не выполнила даже в том случае, когда оканчивающий вышел с большим количеством сведений практического характера.

С этой точки зрения неполнота сведений в вопросах эксплуатации и монтажа не представляет существенного недостатка образования; человек, умеющий самостоятельно работать, легко пополнит недостающее ему в этих областях в чрезвычайно короткий срок времени.

Несколько слов по поводу высказанного инж. Бабат о штатной системе. Штатная система сыграла колossalную роль в деле повышения качества выпускников специалистов, и положение вещей в высшей школе сейчас совершенно нельзя сравнивать с тем, что было несколько лет назад. Никак нельзя такое ответственное и требующее большой организации дело базировать на любителях, оно требует также своих специалистов. Разумеется, никак нельзя оправдать отрыв педагогического персонала от производства там, где это имеет место; исправить это совсем не представит большого труда. Конечно, привлечение к преподаванию специалистов с производством чрезвычайно полезно, однако они могут с моей точки зрения привлекаться только к чтению специальных курсов и к дипломному проектированию, все же основные курсы, лаборатории, курсовое проектирование должны вестись штатным персоналом — педагогами, специально посвятившими себя этому делу.

# О профиле инженера-электрика и многопредметности

Проф. М. Д. КАМЕНСКИЙ

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

Поднятые проф. А. Я. Бергером вопросы являются для преподавательского состава электротехнических вузов и факультетов важными и интересными вопросами.

Проф. А. Я. Бергер ставит два вопроса:

1) О профиле инженера-электрика и в связи с этим о получении студентами производственных навыков.

2) О многопредметности, последовательности курсов и перегрузке студентов.

**О профиле инженера-электрика.** К положению проф. А. Я. Бергера о необходимости усиления связи между вузами и производством можно сразу присоединиться. С введением штатной системы большинство преподавателей специальных дисциплин, ранее имевших возможность успешно совмещать работу в вузах, с постоянной, а часто даже и руководящей работой на производстве, этой возможности лишиены. Но именно эта группа преподавателей в первую очередь особенно и настаивает сейчас на поддержании повседневной живой связи с производством. Инженеры с производства должны привлекаться во втузы для ведения преподавания; им не должны чинить излишних препятствий руководители производства в предоставлении возможности преподавания во втузах; с другой стороны, и руководство втузов, отрегулировав надлежащим образом вопрос о размере их оплаты, не должно загружать их теми добавочными работами (часто вряд ли необходимыми), которые после введения штатной системы должны нести штатные преподаватели.

По поводу остальных положений проф. А. Я. Бергер, имеющихся в данном разделе, необходимо указать следующее.

Научить студента монтажным и эксплоатационным навыкам в стенах вузов на лекциях и занятиях невозможно, да и вряд ли необходимо. Этим навыкам он должен научиться только на производстве. В основном этому может научить и производственная практика, о постановке которой проф. А. Я. Бергер почему-то вовсе не упоминает. На производственную практику в учебном плане вузов отводится не так уже мало времени — не менее четырех месяцев (кроме ознакомительной на 2-м курсе).

Правильно продуманная программа практики и внимательное отношение к ней как со стороны институтов, так и со стороны предприятий могли бы очень помочь студентам понять обстановку и условия работы на производстве и тем самым уяснить себе и определенные методы производства тех или иных работ.

По вопросу недооценки, по мнению проф. А. Я. Бергера, роли конструкторов, следует отметить, что вопросы конструкции механизмов и сооружений, при достаточном числе учебных проектов и наличии дипломного проекта находят свое отражение в учебных планах институтов; в частности, в планах электромеханического факультета Ленинградского политехнического института им. Калинина эти вопросы затрагиваются достаточно подробно. Необходимо, однако, твердо помнить, что на-

стоящими специалистами по конструкциям, а тем более по монтажу и эксплуатации, студенты будут только после того, как поработают определенное время на производстве. Задача втуза заключается в том, чтобы подготовить студентов так, чтобы они могли потом свободно и самостоятельно справляться с указанными работами. Для этого нужны: глубокое знание основ теории, ясное понимание физической стороны явлений, умение проводить расчеты, большой опыт работы в лабораториях, умение работать самостоятельно и знание самых основных принципов экономики и организации соответствующей отрасли производства.

**По вопросу многопредметности, последовательности курсов и перегрузки студентов.** Проф. Бергер предлагает, чтобы все специальные электротехнические дисциплины были объединены только двумя курсами: а) электрических машин и б) электрических установок.

Проф. А. Я. Бергер при этом ссылается на то, что лет 20 назад специальные электротехнические дисциплины изучались только под двумя названиями: электромашины и электроустановки. В прежних технологических институтах такое деление электротехнических дисциплин было, очевидно, правильным. В Ленинградском политехническом институте им. Калинина на электромеханическом факультете чуть ли не с его основания всегда были самостоятельные курсы станций, сетей, передачи электроэнергии, техники высокого напряжения и т. д. В дальнейшем лет 10—12 назад со значительным развитием техники из указанных курсов выделились в виде самостоятельных: курс релейной защиты, курс токов к. з.; курс техники высоких напряжений; появились совсем новые предметы: автоматика и телемеханика, ионные и электронные приборы, курс машин получил дальнейшее развитие в виде курса электропривода и т. д.

В настоящее время нельзя найти для специального электротехнического факультета преподавателя, знающего в совершенстве и сети, и автоматику, и электростанции, и токи к. з., и технику высоких напряжений. На энергетической специализации все данные дисциплины должны читаться и читаются отдельными преподавателями, являющимися крупными специалистами, каждый в своей области. Для других специализаций допустимо объединение отдельных из указанных дисциплин в общие курсы, но, конечно, до известного предела.

Уместно здесь подчеркнуть, что понятие многопредметность отождествляется многими с понятием большого количества экзаменов. Это смешение понятий уже привело к тому, что стали объединять под одним названием самые разнообразные дисциплины, однако число экзаменов при этом фактически не уменьшилось.

Проф. А. Я. Бергер обращает внимание на ненужные повторения, которые имеют место по его мнению при существующем разделении специальных электротехнических дисциплин. Повторений можно всегда избежать при правильной методической работе факультета в целом, путем непосредственного согласования программ по отдельным дисциплинам и при наличии хорошо продуманного учебного плана.

Проф. А. Я. Бергер предполагает, что при объединении всех не машинных курсов в один — курс электрических машин может быть увеличен, и все студенты, независимо от специализации, получат добавочные сведения «о конструкциях машин в минимально необходимом (хотя бы для знания ремон-

та машин) объеме». Вряд ли необходимо из-за вопросов техники ремонта увеличивать для всех курс машин.

Необходимо лишь рекомендовать студентам на практике обязательно принимать участие в бригадах по ремонту электрических машин.

Для специализации электрических машин особый курс конструкций должен читаться; такой курс и читается. Однако читающий этот курс не должен забывать сказанного уже выше и не повторять в разделе конструкций общей теории электрических машин.

То, что курс электрических машин является базисным для всех других последующих специальных дисциплин, совершенно верно. Но проф. А. Я. Бергер должен был указать еще и другой такой же базисный курс, как и электрические машины, — это курс теоретической электротехники (физические основы электротехники и теории переменных токов). От того, насколько удачно поставлено преподавание на этих двух базисных дисциплинах, зависит успех прохождения и дальнейших специальных курсов.

Хотя курс электрических машин и является базисным, возникает вопрос о том, должен ли курс «токов короткого замыкания» относиться к кафедре электрических машин.

Существует мнение, достаточно обоснованное к тому же, что курс т. к. з. должен относиться к кафедре «Электрические сети и системы», так как к этой кафедре относится и курс устойчивости параллельной работы станции и сетей.

Ставя свои вопросы, проф. А. Я. Бергер должен был поставить и еще один вопрос, связанный со всем сказанным выше. Это, вопрос о специализациях на электротехнических и энергетических факультетах (и в вузах). При тех высоких требованиях, которые предъявляются к инженерам, оканчивающим втузы, чрезмерное увеличение числа специализаций не оправдывается. Именно специализации вызывают появление ряда мелких дисциплин. Ряд основных специализаций по электроэнергетике и электромеханике бесспорно имеет все основания для своего существования и будет сохранен и в дальнейшем. Но излишнее дробление их специализаций нецелесообразно. Профиль инженера-электрика должен определяться его дипломным проектом или дипломной работой. При этом на 5-м курсе допустимо иметь, в зависимости от профиля, один или два специальных предмета, прохождение которых обязательно только для дипломантов данного профиля.

На статью проф. А. Я. Бергера в редакцию при слан обстоятельный ответ инж. Г. И. Бабат (Ленинградский завод «Светлана»). Не считая целесообразным останавливаться на некоторых деталях ответа инж. Г. И. Бабат, необходимо подчеркнуть правильность всех основных положений последнего. Очень правильно и своевременно поставлен инж. Г. И. Бабатом вопрос о подготовке аспирантов по специальным электротехническим дисциплинам. Аспиранты по этим дисциплинам, конечно, должны большую часть времени проводить на производстве.

Применяемая сейчас регламентация работы аспирантов, предусматривающая, как правило, пребывание их в течение всего рабочего времени в стенах институтов, должна быть пересмотрена ВКВШ.

## Инженеру-электрику нужно знать не только электрические машины

Проф. С. М. БРАГИН

Московский энергетический институт им. Молотова

Проф. А. Я. Бергер предлагает ввести курс «Электротехнические установки» на 4 курсе втузов с тем, чтобы на 5 курсе можно было бы дать все необходимые дополнения к этому курсу в зависимости от специальности. За счет экономии времени от введения такого курса — несколько расширить курс электрических машин и дать конструкцию электрических машин всем электрикам, считая, что знание машин равнозначно знанию основ электротехнической науки.

Мне кажется, что при современном развитии электротехники следует считать распределительные устройства, высоковольтную аппаратуру и электрические кабели не менее важными звеньями электрической цепи, чем машины.

Объединенный курс, предлагаемый проф. Бергер, не позволил бы развиваться остальным специальностям в должной мере, а выпускаемые инженеры-электрики, знающие «немножко больше» по машинам, ничего бы не знали, например, по кабельной технике.

С полным правом можно сказать, что в наш век развитой электротехники о электрических кабелях приходится иметь дело каждому инженеру-электрику, а ведь до сих пор ни в одном втузе нет хотя бы небольшого самостоятельного общего для всех электротехнических специальностей курса, который дал бы будущим инженерам-электрикам сведения, касающиеся кабельной продукции, ее свойств и области применения.

В самом лучшем случае сообщаются некоторые сведения в этой области в общем курсе материаловедения, т. е. пользуются кабелем для иллюстрации применения изолирующих материалов в кабельной промышленности.

Готовить инженеров-электриков, имеющих правильное понятие о значимости и особенностях всех звеньев энергетической схемы, конечно, нужно, но основой для этого должен быть не общий курс «Электротехнических установок», а ряд отдельных курсов, читаемых представителями специальных кафедр на 4 курсе.

Нужно готовить инженеров-электриков, знакомых с производством электротехнических изделий в соответствии с выбранной специальностью.

В качестве примера хотелось бы привести организацию подготовки инженеров-электриков, специалистов по кабельной технике. Созданная для этого кафедра кабельной техники в Московском энергетическом институте им. Молотова с самых первых шагов своего существования в основу специальной подготовки студентов-кабельщиков на 5 курсе положила три дисциплины, а именно, теорию кабеля, технологию кабельных изделий и основы эксплуатации проводов и кабелей. Таким образом будущий инженер кабельной специальности знакомится с теoriей, производством и основами эксплуатации в пределах выбранной специализации.

Теперь относительно предложений инж. Г. И. Бабат.

Специальные кафедры всегда могут иметь тесную связь с производством и даже помогать ему в ре-

шении текущих и проблемных задач, если кафедра ведет научно-исследовательскую работу и в особенности хорасчетную по договорам с промышленностью.

Это будет стимулировать развитие научно-исследовательских работ по заданию промышленности и способствовать расширению и укреплению лабораторно-промышленной базы специальных кафедр.

Привлечение специалистов с производства, конечно, весьма полезно, и с этой точки зрения предлагаемое инж. Г. И. Бабат введение для кафедр практических дисциплин званий сверхштатных профессоров и доцентов должно способствовать укреплению связи между кафедрами вузов и промышленностью, а также и повышению качества читаемых на специализациях курсов, в особенности по технологии.

Что касается поставленного инж. Бабат вопроса о подготовке аспирантов в промышленных заводских лабораториях, то для специальных кафедр, не имеющих тесной связи с производством и достаточно развитой лабораторной базы, этот метод подготовки аспирантов можно было бы еще считать временно допустимым впредь до развития собственных лабораторий и укрепления связи с производством.

щее время. Второй вид использования специалистов с производства желательно иметь для чтения небольших специальных курсов.

Опыт ряда вузов засвидетельствовал целесообразность такого мероприятия, и по этому вопросу мы согласны с аргументацией инж. Г. И. Бабат.

Штатные же педагоги вузов должны читать основные курсы более укрупненные, чем это наблюдается в настоящее время, но не с доведением объединения до таких размеров, о которых говорит проф. А. Я. Бергер.

Для повышения квалификации педагогического персонала вузов и подготовки аспирантов необходимо всемерно развивать научную работу в стенах вузов, а для этого очень важно иметь хорошие лаборатории. Если бы эта задача была разрешена, то и подготовка аспирантов была бы вполне успешно организована при вузах, а не на предприятиях.

Для пополнения знаний выпускаемых специалистов в области монтажа и эксплоатации электроустановок главная роль ложится на производственную практику. Только укреплением внутренней организации вузов и развитием научно-исследовательской работы в их стенах можно добиться хороших результатов подготовки специалистов.

## Укреплять лаборатории, развивать научную работу во вузах

Проф. В. Н. СТЕПАНОВ

Московский институт механизации и электрификации сельского хозяйства им. Молотова

В системе подготовки в школе лиц с инженерным образованием большая роль должна отводиться дипломному проектированию. На этой работе студент подводит итоги всей своей теоретической подготовки, приобретает навык в самостоятельной творческой работе и знакомится с новейшим состоянием техники своей специальности.

Обеспечение руководством по дипломному проектированию возлагается на кафедры специальных дисциплин. Вследствие этого такие кафедры имеют значительное преобладание часов на дипломное проектирование сравнительно с часами по другим видам занятий.

Так например, в Институте механизации и электрификации сельского хозяйства кафедра «Применение электричества в сельском хозяйстве» и кафедра «Производства и распределения электрической энергии» имеют по 400 часов на лекции, 250—300 час. на семинарские и лабораторные занятия и по 1500 часов на дипломное проектирование. При установлении же штатных единиц оперируют с суммарным числом часов.

Вследствие этого некоторые штатные преподаватели принуждены брать большое число студентов-дипломников (по 12—15 человек). Это ведет к снижению качества руководства. Кроме того, при ограниченном числе руководителей сужается круг тем.

Для устранения этих недостатков необходимо широкое привлечение специалистов с производства для руководства студентами по дипломному проектированию; оплату этих специалистов нужно производить по часам, отводя для этого значительно больший часовой фонд, а не 10%, как в настоя-

## Устраним шаблон в учебном и дипломном проектировании

Канд. техн. наук А. И. БЕРТИНОВ

Харьковский электротехнический институт

Поступающие на завод молодые специалисты во многих случаях стремятся в проектно-технические отделы и лаборатории. 90—95% студентов последнего выпуска, пришедших на ХЭМЗ, изъявили желание работать в указанном направлении. Таким образом завод не получает от высшей школы в достаточном количестве специалистов-производственников и конструкторов.

Наши электротехнические вузы не дают студентам производственных навыков, не развивают любви к производству и конструированию, а это обстоятельство чрезвычайно важно, если учесть, что учащиеся вузов преимущественно состоят из воспитанников средней школы, незнакомых с производством, лишенных производственных навыков.

Молодые специалисты, вышедшие из вузов, имеют неплохую теоретическую подготовку, но проявляют исключительное незнакомство с элементарными вопросами производства и конструирования.

Резкий недостаток знания организации, экономики, планирования и технологии производства, стандартов и нормативов, нормирования и организации труда приводят к тому, что молодой специалист теряется на производстве, боится его. Это объясняется сугубо «школьными» методами обучения и воспитания будущих инженеров. Удельный вес и качество практических занятий, лабораторных и проектных работ не достаточны. При этом ускользает основная задача института в воспитании навыков самостоятельной инженерной работы на основе общетеоретических и специальных дисциплин и умения использовать богатейшую техническую литературу. Существующая система стандартных

практических заданий, лабораторных задач и проектов должна быть вкорне изменена. Курсовые и дипломные проекты должны быть построены так, чтобы в них имелись элементы научно-исследовательской работы. Например, курсовой проект электрической машины должен включать не только стандартные решения по конструкции и расчету, но и разделы по сравнительному анализу методов расчета и конструирования отдельных узлов машины, сравнительный анализ методов расчета реактансов, потерь, систем охлаждения и т. д. При такой постановке вопроса к преподавательскому и профессорскому персоналу предъявляются весьма высокие требования в смысле непрерывного ведения самостоятельной научно-исследовательской работы саким этим персоналом.

Следующим немаловажным недостатком в системе институтского образования является отсутствие (за небольшими исключениями) исторического подхода при изложении специальных дисциплин. Вследствие этого те или иные методы решения технических задач воспринимаются студентами как застывшие рецепты и догмы, а не как этап в развитии техники. В результате такого неисторического подхода у студентов, будущих инженеров, не стимулируется стремление к самостоятельной работе и дальнейшему развитию вопросов техники.

Производственная практика студентов, как правило, протекает неудовлетворительно. По существу имеет место не практика, а массовые экскурсии на производство.

Необходимо поставить практиканта на рабочее место в бригаду, поручить ему конкретную работу, требовать ответственного исполнения. Мы предлагаем установить две практики, каждая длительностью в 3—4 мес.: первая — общетехнологическая; вторая — инженерная.

Во время второй, преддипломной практики студенты должны выполнять работу техника (конструктора или производственника).

Программа производственной практики и отчеты должны быть предметом внимательного рассмотрения.

Наряду со штатными работниками института к научно-педагогической деятельности должны быть привлечены широкие круги высококвалифицированных инженерно-технических работников предприятий для чтения специальных курсов, — курсового и дипломного проектирования. Это ознакомит студентов с фактическим материалом и методологией, отражающими последние достижения союзной и иностранной техники, вовлечет студентов со школьной скамьи в решение актуальных задач народного хозяйства.

Вместе с этим высококвалифицированная группа инженерно-технических работников завода сумеет обобщать практический опыт, что будет способствовать техническому росту инженерно-технических кадров производства. Необходимо создать условия, при которых растущие инженеры предприятий могли бы без отрыва от производства подготавливать диссертации и оформлять ученыe степени кандидатов и докторов технических наук. Это будет стимулировать научно-технический рост кадров.

Учитывая широкое развитие отдельных отраслей знаний, необходима после общетехнических курсов первых 3 лет более узкая специализация в подготовке кадров, глубокая подготовка специалистов отдельных отраслей народного хозяйства.

Тезисы, выдвинутые проф. Бергером, о создании

единого курса электроустановок, совершенно неприменимы и по сути являются возвращением к старины, когда электротехника укладывалась в объеме единого курса.

Наука и техника так бурно развиваются, что на долю каждого из нас приходится узкая область работы, но она охватывает всесторонние знания.

В учебные программы всех специальностей необходимо включить ряд наук, крайне необходимых каждому инженерно-техническому работнику. К таким наукам относятся: организация производства и труда, планирование производства и ряд специальных технологических дисциплин.

## Усилить преподавание специальных дисциплин

Доц. В. А. ПРИВЕЗЕНЦЕВ

Московский энергетический институт им. Молотова

Вопрос об электротехническом образовании поднят журналом «Электричество» своевременно, так как в этом деле у нас много недочетов, требующих принятия решительных мер. В этом отношении статья проф. А. Я. Бергера весьма актуальна.

Однако, с проф. Бергером можно согласиться только в том, что выпускаемые электротехническими вузами студенты в большинстве своем явно недостаточно подготовлены как в части специальных дисциплин, так и для работы непосредственно на производстве.

Точно так же проф. Бергер прав, когда говорит о недостаточных знаниях самих преподавателей в области специальных дисциплин.

Вместе с тем проф. Бергер слишком узко ставит вопрос, говоря и пропагандируя, главным образом, расширенное преподавание курса электрических машин.

Так вопрос, конечно, ставить нельзя. Получается впечатление, что проф. Бергер ставит вопрос не об электротехническом образовании в целом, а об усилении курса электрических машин.

Далее никакой критики не выдерживает предложение проф. Бергера вместо ряда специализированных курсов читать один курс «Электротехнические установки». В этом отношении указания инж. Бабат совершенно правильны и обоснованы. К этому можно только добавить, что проф. Бергер сам себе противоречит: с одной стороны, он требует (и совершенно правильно) повышения качества преподавания специальных дисциплин; с другой стороны, введением одного курса «Электротехнические установки» это все сводится на нет, так как при наличии одного курса многие вопросы промышленной электротехники будут освещены очень плохо или совсем не освещены.

Точно так же весьма сомнительно положение, выдвигаемое проф. Бергером относительно необходимости углубленных знаний электрических машин для инженеров-электриков всех специальностей. Это, конечно, не так! Устройство электрических машин должен знать каждый инженер-электрик, но объем этих знаний для инженеров-электриков различных специальностей должен быть различным: от инженера, работающего по проектированию и изготовлению электрических машин на заводах «Динамо»,

«Электросила» и т. п. требуются в этой области одни знания, а от инженера-электрика, работающего на кабельных заводах, на «Изоляторе», «Изолите», на электропередачах и т. д., совершенно другие.

Вся задача сводится к усилению преподавания специальных дисциплин с уделением в них должного внимания вопросам технологии производства различных машин и аппаратов. В частности, применительно к каждой специальности должен читаться углубленный курс изоляционных материалов, так как скучные знания об электроизоляционных материалах у молодых специалистов часто создают им большие затруднения, когда они начинают работать на производстве.

В связи с этим большого внимания заслуживает предложение инж. Бабат о преподавателях специальных дисциплин.

Он совершенно прав, указывая, что должное изложение специальных курсов могут обеспечить только высококвалифицированные специалисты с производства.

Поэтому я целиком и полностью присоединяюсь к предложению инж. Бабат относительно кафедр практических дисциплин.

Этот вопрос нужно вскоре пересмотреть и дать более широкую возможность высококвалифицированным специалистам с производства вести преподавание практических дисциплин.

## Динамическое равновесие систем с непрерывно меняющейся нагрузкой

Акад. В. П. НИКИТИН

*Всякий покой, всякое равновесие имеет только относительное значение, имеет смысл только по отношению к той или иной форме движения.*

Энгельс

Энергетический баланс производственных машин, работающих с непрерывно меняющейся нагрузкой, в каждый момент времени определяется состоянием равновесия. Это состояние равновесия не остается длительно устойчивым в подобных машинах, а меняется в функции текущей переменной времени.

Так например, при работе электрического генератора на дугу при сварке металлов плавление электрода и переход капли на изделие вызывают резкие колебания длины дуги и повторяющиеся через очень малые промежутки времени (до 30 и более раз в секунду) короткие замыкания генератора. Ток и напряжение при этом не постоянны, а колеблются от некоторого значения до максимального и обратно.

В качестве другого примера можно привести двигатель артиллерийской башни или орудия или двигатель прокатного стана.

Двигатель артиллерийской башни или орудия должен в определенный промежуток времени повернуть орудие в положение выстрела, а после выстрела снова вернуть его в положение для заряжения и т. д. Понятно, что все эти перемещения двигатель должен производить в кратчайший промежуток времени.

На прокатном реверсивном стане двигатель должен то вращаться в одну сторону, то останавливаться, то вращаться в другую сторону. Нагрузка его за время прокатки не остается неизменной, а меняется через короткие промежутки времени в широких пределах.

Подобные резкие изменения нагрузки нарушают установившееся длительное состояние равновесия в системе и вызывают в ней переходные процессы. Переход от одного установившегося состояния равновесия к другому обычно сопровождается появлением сил переходного процесса, действующих в системе от начала нарушения

состояния равновесия до перехода системы в новое состояние длительного равновесия.

Действие этих сил переходного процесса выражается в том, что в системе в каждый момент времени устанавливается динамическое равновесие, которое и характеризует устойчивость работы данной системы.

Кроме приведенных примеров, к этим же системам с непрерывно меняющейся нагрузкой следует отнести и такие производственные машины, как подъемные краны, трамваи, ткацкие станки, штампы, сварочные машины для контактной сварки, электро-, турбо- и гидрогенераторы и т. п.

При рассмотрении работы всех подобных производственных машин и машин-двигателей естественно возникают следующие вопросы:

1. Каковы будут условия динамического равновесия системы, или будет ли работа системы устойчивой?

2. Каковы будут мгновенные значения перемещений, позволяемых связями системы при переходных процессах, или каковы будут изменения при переходных процессах основных параметров, как моменты, скорости, ток и т. д.?

3. Как скоро будет происходить переход системы из одного длительно устойчивого состояния равновесия в другое?

Решение поставленных вопросов и применение этого решения как общего закона динамического равновесия на примерах электрических двигателей и генераторов и явилось целью настоящей и последующих работ.

**Общий вид условий устойчивости.** Под устойчивостью системы понимается такое ее состояние, когда при изменении производственных условий и возникших вследствие этого отклонений от положений длительно устойчивого равновесия система быстро приходит снова в состояние равновесия.

Предположим, что производственная машина имеет характеристику вида  $M_c = f(\omega)$ , а двигатель —  $M = f(\omega)$ , представленные на рис. 1, где  $M$  — момент, развиваемый двигателем;  $M_c$  — момент сопротивления производственной машины,  $\omega$  — угловая скорость.

Состояние при установившемся режиме работы или состоянии длительно устойчивого равновесия определяется как состояние, которое не изменяется со временем, т. е.

$$\frac{d\omega}{dt} = 0 \text{ и } M(\omega) = M_c(\omega).$$

На рис. 1 это состояние определяется точкой пересечения характеристик производственной машины и машины-двигателя.

Если  $J$  — момент инерции, а  $\frac{d\omega}{dt}$  — ускорение, то уравнение машины-двигателя может быть представлено так:

$$M = f(\omega) + J \frac{d\omega}{dt} \quad (1)$$

или, так как  $M_c = f(\omega)$ ,

$$M = M_c + J \frac{d\omega}{dt}. \quad (1a)$$

Если под действием тех или иных причин нарушится условие равновесия, то значения  $M_c$ ,  $M$  и  $\omega$  получат приращения  $\Delta M_c$ ,  $\Delta M$  и  $\Delta\omega$ .

Если для состояния равновесия при установившемся режиме работы  $\omega = \omega_y$ ,  $M_c = M_{cy} = M = M_y$ , то в случае отклонения от положения равновесия

$$M_c = M_{cy} + \Delta M_c; \quad M = M_y + \Delta M; \quad \omega = \omega_y + \Delta\omega. \quad (2)$$

Уравнение (1a) в этом случае для приращения  $\Delta M$  напишется так:

$$\Delta M = \Delta M_c + J \frac{d\Delta\omega}{dt}. \quad (3)$$

Предполагая, что  $\Delta\omega$  настолько мало, что в интервале между  $\omega = \omega_y$  и  $\omega = \omega_y + \Delta\omega$  обе зависимости  $M = f(\omega)$  и  $M_c = f(\omega)$  изменяются по прямой линии,

$$\Delta M_c = \Delta\omega \frac{dM_c}{d\omega} \quad \text{и} \quad \Delta M = \Delta\omega \frac{dM}{d\omega}. \quad (4)$$

Заменяя в уравнении (3) значения  $\Delta M_c$  и  $\Delta M$  их значениями из уравнения (4) и произведя перестановку, имеем:

$$J \frac{d\Delta\omega}{dt} + \left( \frac{dM_c}{d\omega} - \frac{dM}{d\omega} \right) \Delta\omega = 0. \quad (5)$$

Последнее уравнение представляет собою не что иное, как уравнение движения системы.

После интегрирования уравнения (5) имеем:

$$\Delta\omega = \Delta\omega_0 e^{-\frac{1}{J} \left( \frac{dM_c}{d\omega} - \frac{dM}{d\omega} \right) t}. \quad (6)$$

Полученное приращение  $\Delta\omega$  в зависимости от значения показателя степени будет с течением времени либо убывать — режим будет устойчивым — либо возрастать — режим будет неустойчивым. Для того чтобы  $\Delta\omega$  стремилось убывать, т. е. колебания были бы затухающими и режим устойчивым, необходимо иметь:

$$1) \quad J > 0, \quad (7)$$

$$2) \quad \frac{dM_c}{d\omega} - \frac{dM}{d\omega} > 0. \quad (8)$$

При заданном режиме производственной машины, когда  $\frac{dM_c}{d\omega} = \text{const}$ , условие (8) может быть написано так:

$$\frac{dM_c}{d\omega} - \frac{dM}{d\omega} = S, \quad (9)$$

где  $S$  — может быть названо коэффициентом устойчивости.

Подставив значение  $S$  в формулу (6), будем иметь для приращения  $\Delta\omega$

$$\Delta\omega = \Delta\omega_0 e^{-\frac{St}{J}}. \quad (10)$$

Приращение  $\Delta\omega$  будет уменьшаться или режим будет устойчивым, когда: 1) момент инерции  $J$  машины-двигателя больше нуля, 2) коэффициент устойчивости  $S$  имеет положительное значение.

Если  $\omega$  — мгновенное значение скорости при переходном процессе,  $\omega_y$  — установившееся значение скорости при первоначальном состоянии, то можно будет написать:

$$\omega - \omega_y = \Delta\omega = \Delta\omega_0 e^{-\frac{St}{J}}, \quad (11)$$

т. е. разность между мгновенным значением и установившимся  $\omega_y$  убывает по показательной кривой.

Скорость процесса убывания приращения  $\Delta\omega$  будет тем больше, чем больше величина  $S$ , или иначе — система тем скорее приходит в равновесие, чем больше коэффициент устойчивости.

Значение коэффициента устойчивости  $S$ , как это следует из условия устойчивости (9), при заданном режиме производственной машины определяется как разность между производной  $\frac{dM_c}{d\omega}$  характеристики производственной машины и производной  $\frac{dM}{d\omega}$  характеристики машины-двигателя.

Эти производные на рис. 1 равны тангенсам углов наклона в рассматриваемой точке характеристики, и величина  $S$  определяется как разность тангенсов

$$\operatorname{tg} \alpha_m = \frac{dM_c}{d\omega} \quad \text{и} \quad \operatorname{tg} \alpha_d = \frac{dM}{d\omega},$$

$$S = \frac{dM_c}{d\omega} - \frac{dM}{d\omega} = \operatorname{tg} \alpha_m - \operatorname{tg} \alpha_d \quad (12)$$

или, если  $\operatorname{tg} \alpha_m = R_m$ , а  $\operatorname{tg} \alpha_d = R_d$ , где  $R_m$  — сопротивление или сила связи производственной машины, а  $R_d$  — сопротивление или сила связи машины-двигателя,

$$S = R_m - R_d = R_s. \quad (13)$$

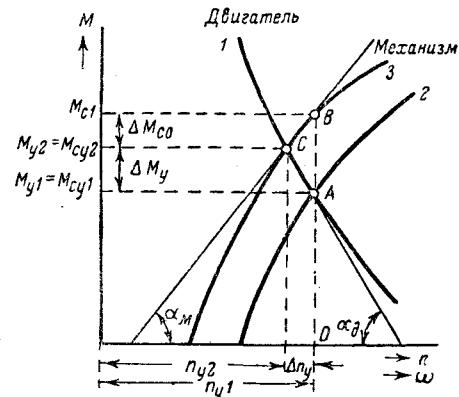


Рис. 1

Коэффициент устойчивости определяется как разность между силой связи производственной машины и силой связи машины-двигателя и может быть представлен как разностная сила связи данной системы.

Общая продолжительность перехода с одного режима на другой определится из выражения (11)

$$\frac{\omega - \omega_y}{\Delta \omega_y} = e^{-\frac{R_s}{J} t} = \frac{\Delta \omega}{\Delta \omega_y} \quad (14)$$

и будет равна

$$t = \frac{J}{R_s} \ln \frac{\Delta \omega_y}{\Delta \omega}$$

или

$$t = \frac{J}{S} \ln \frac{\Delta \omega_y}{\omega - \omega_y}. \quad (15)$$

Продолжительность переходного процесса будет тем меньше, чем больше разностная сила связи системы или чем больше коэффициент устойчивости.

Подобные же выводы могут быть получены при рассмотрении работы и других систем, например работы электрического генератора на дугу при сварке металлов<sup>1</sup>.

Предположим, что сварочный генератор, питающий вольтовую дугу, имеет характеристику (рис. 2)  $U=f(I)$ , а дуга — характеристику  $U_d=f(I)$ , где  $U$  — напряжение на зажимах генератора,  $U_d$  — напряжение на зажимах дуги,  $I$  — ток.

Режим дуги определяется условием равновесия, т. е. точкой пересечения характеристик дуги и генератора, причем под режимом дуги понимается такое ее устойчивое состояние, когда дуга может гореть длительно при определенной величине тока, не угасая и не переходя в другие формы разрядов. Если  $L$  — индуктивность генератора, то уравнение его характеристики может быть представлено так:

$$U = f(I) - L \frac{dI}{dt}. \quad (16)$$

В результате решения этого уравнения получаем:

$$\Delta I = \Delta I_0 e^{-\frac{1}{L} \frac{dU_d}{dI} - \frac{dU}{dI}}, \quad (17)$$

<sup>1</sup> В. П. Никитин, „Электричество“, № 9–10, 1928; Никитин В. П. Электрические машины и трансформаторы, 1937.

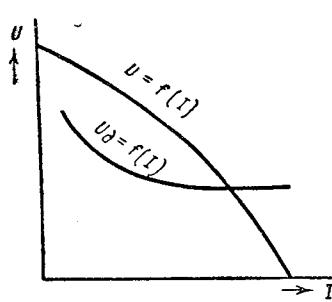


Рис. 2

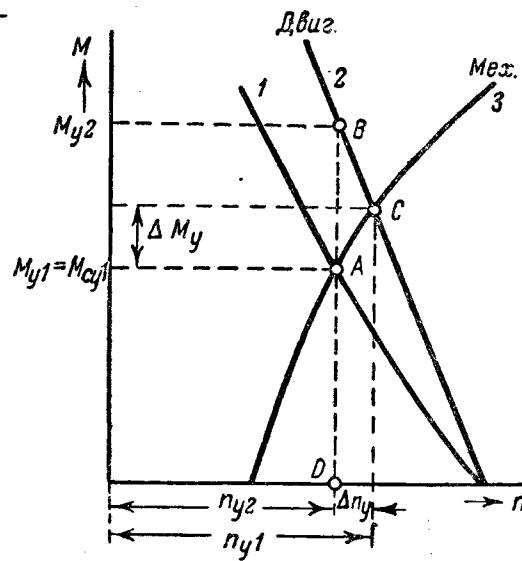


Рис. 3

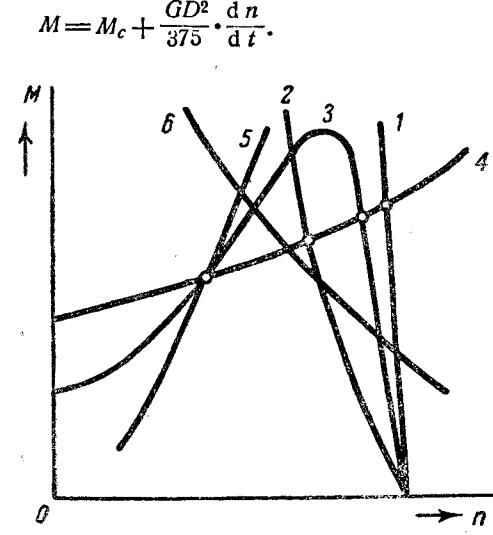


Рис. 4

из которого имеем два условия устойчивости: 1)  $L > 0$  — индуктивность генератора, питающего дугу, должна быть больше нуля, 2)  $\frac{dU_d}{dI} - \frac{dU}{dI} = S$  — коэффициент устойчивости должен иметь положительное значение.

Аналогичные выводы могут быть получены в случае, если вместо вольтовой дуги будет пытаться какой-либо другой потребитель энергии или электрическая цепь, содержащая емкость и самоиндукцию.

**Условия устойчивой работы системы электродвигатель-механизм.** Свойства электродвигателя, характеризующие его при работе на какой-либо привод, определяются его механической характеристикой, представляющей зависимость момента вращения от угловой скорости или числа оборотов.

Рабочее состояние или состояние длительно устойчивого равновесия системы электродвигатель-механизм определяется, как показано на рис. 1, точкой пересечения механических характеристик электродвигателя  $M = f(n)$  и привода  $M_c = f(n)$ .

При переходе с режима, представленного на характеристиках рис. 1 значениями  $M_{y_1} = M_{cy_1}$  и  $n_{y_1}$ , на режим  $M_{y_2} = M_{cy_2}$  и  $n_{y_2}$ , что соответствовало бы переходу с одной характеристики механизма на другую, момент сопротивления механизма  $M_c$ , момент вращения двигателя  $M$  и число оборотов  $n$  будут иметь отклонения от значений, характеризуемых точкой  $C$  нового состояния равновесия:

$$\Delta M_y = M - M_{y_2}; \quad \Delta M_{c_1} = M_{c_0} - M_{cy_2}; \quad \Delta n_y = n_{y_1} - n_{y_2}.$$

Мгновенные значения переменных величин  $M$ ,  $M_c$  и  $n$  будут:

$$M = M_{y_2} + \Delta M; \quad M_c = M_{cy_2} + \Delta M_c \text{ и } n = n_{y_2} + \Delta n.$$

Вращающий момент двигателя может быть представлен общезвестным выражением:

$$M = M_c + J \frac{d\omega}{dt},$$

где  $J$  — приведенный к валу двигателя момент инерции привода.

Так как обычно в теории и практике электропривода пользуются вместо момента инерции понятием махового момента привода  $GD^2$ , то основное уравнение движения получит вид:

$$M = M_c + \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}.$$

В результате решения этого уравнения по предыдущему получаем для отклонения число оборотов

$$\Delta n = \Delta n_y e^{-\frac{375}{GD^2} \left( \frac{dM_c}{dn} - \frac{dM}{dn} \right) t}.$$

Из последнего выражения следует, что состояние системы электродвигатель-механизм будет устойчивым, — или  $\Delta n$  будет стремиться убывать, — в том случае, если

$$\begin{aligned} 1) \quad & GD^2 > 0, \\ 2) \quad & \frac{dM_c}{dn} - \frac{dM}{dn} > 0. \end{aligned}$$

Подобные же условия устойчивости получаются, если рассматривать изменение рабочего состояния при переходе двигателя с одной характеристики на другую. Предположим, что состояние равновесия системы определяется точкой  $A$  (рис. 3) пересечения характеристики 1 двигателя и 3 механизма. Двигатель вследствие, например, выключения сопротивления из цепи якоря переходит на характеристику 2. Если при этом пренебречь индуктивностью цепи якоря и допустить, что магнитный поток двигателя не изменяется, то возрастание момента двигателя от величины  $DA$  до величины  $BD$  будет происходить мгновенно и переходный процесс — протекать по участку  $BC$  характеристики двигателя и по участку  $AC$  характеристики механизма.

Заменив подобно предыдущему на характеристиках участки  $BC$  и  $AC$  отрезками прямых, можно получить выражение для  $\Delta n$  для случая перехода с одной характеристики двигателя на другую.

Представляя второе условие устойчивости через коэффициент устойчивости  $S$ , получим

$$\Delta n = \Delta n_y e^{-\frac{375S}{GD^2} t}.$$

Условия устойчивости теперь могут быть представлены так:

$$\begin{aligned} 1) \quad & GD^2 > 0, \\ 2) \quad & \frac{dM_c}{dn} - \frac{dM}{dn} = S > 0. \end{aligned}$$

Первое условие почти во всех машинах выполняется, так как момент инерции их положителен; выполнение же второго условия, как будет показано ниже, зависит от формы характеристик двигателя и привода. На рис. 4 приведены различные по форме характеристики шунтового, компаундного и асинхронного двигателей и характеристика 4 привода с вентиляторным моментом, как наиболее часто встречающимся. Значение  $\frac{dM}{dn}$ , которое может быть представлено тангенсом угла наклона к оси абсцисс, проведенным в рабочей точке, для характеристик шунтового, компаундного и для правой нисходящей части характеристики асинхронного двигателей имеем отрицательный знак, а значение  $\frac{dM_c}{dn}$  — положительно,  $S > 0$ ; следовательно, условие второе выполнено и система будет работать устойчиво. Для левой восходящей части характеристики асинхронного двигателя условие второе не выполнено, так как значение  $\frac{dM}{dn}$  в этом случае положительно, а  $\frac{dM_c}{dn}$  по абсолютной величине меньше, чем  $\frac{dM}{dn}$  и, следовательно, система будет неустойчивой.

Однако, если характеристика механизма 5 имеет наклон к оси абсцисс больший, чем наклон характеристики 3 двигателя, т. е. если  $\frac{dM_c}{dn} > \frac{dM}{dn}$ , то и для левой восходящей части характеристики асинхронного двигателя равновесие системы устойчиво.

Если характеристика механизма  $M_c = f(n)$  будет падающая, например для стана бесслитковой прокатки, и имеет вид характеристики 6 рис. 4, т. е.  $\frac{dM_c}{dn} < 0$ , то для правой нисходящей части характеристики двигателя, т. е. для  $\frac{dM}{dn} < 0$ , работа будет устойчивой только при таком угле наклона характеристики механизма, при котором по абсолютной величине  $\left| \frac{dM}{dn} \right| > \left| \frac{dM_c}{dn} \right|$ . Иначе говоря, если характеристика двигателя будет круче характеристики механизма, в противном случае работа будет неустойчивой, так как

$$S = - \left| \frac{dM_c}{dn} \right| + \left| \frac{dM}{dn} \right| < 0.$$

Для левой восходящей части характеристики двигателя, т. е. при  $\frac{dM}{dn} > 0$ , работа при любых наклонах падающей характеристики механизма будет неустойчивой, так как

$$S = - \left| \frac{dM_c}{dn} \right| - \left| \frac{dM}{dn} \right| < 0.$$

Аналогично для подобной падающей характеристики  $M_c = f(n)$  механизма (стана бесслитковой прокатки) работа шунтового двигателя может быть как устойчивой, так и неустойчивой, в зависимости от угла наклона характеристики механизма. Допустим, что двигатель, имея характеристику 1 (рис. 5), работает сначала с механизмом, имеющим характеристику 2, а затем с механизмом с характеристикой 3. В обоих случаях величины  $\frac{dM}{dn}$  и  $\frac{dM_c}{dn}$  будут отрицательными, т. е.

$$S = - \left| \frac{dM_c}{dn} \right| + \left| \frac{dM}{dn} \right|.$$

При характеристике 2 механизма состояние равновесия будет неустойчивым, так как по абсолютной величине  $\frac{dM_c}{dn} > \frac{dM}{dn}$  и  $S < 0$ ; наоборот, при характеристике 3 механизма  $\frac{dM_c}{dn} < \frac{dM}{dn}$  и  $S > 0$ , следовательно, состояние будет устойчивым.

При тормозных режимах условия устойчивости могут быть получены аналогично предыдущему. Необходимо лишь помнить, что вследствие изменения направления момента двигателя меняется знак перед  $M$ , и тогда, например, для торможения при горизонтальном движении

$$\begin{aligned} \Delta n = \Delta n_y e^{-\frac{1}{J} \left( \frac{dM_c}{dn} + \frac{dM}{dn} \right) t}, \\ S = \frac{dM_c}{dn} + \frac{dM}{dn}. \end{aligned}$$

Для торможения при отрицательном статическом моменте (так как меняется знак также и перед  $M$ )

$$\begin{aligned} \Delta n = \Delta n_y e^{-\frac{1}{J} \left( \frac{dM}{dn} - \frac{dM_c}{dn} \right) t}, \\ S = \frac{dM}{dn} - \frac{dM_c}{dn}. \end{aligned}$$

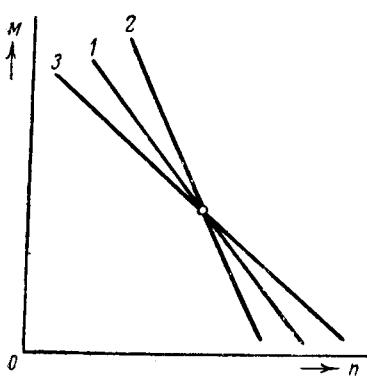


Рис. 5

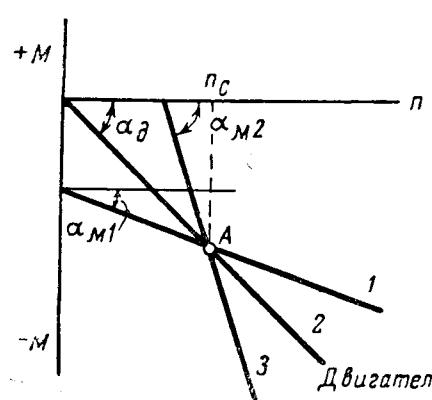


Рис. 6

На рис. 6 представлены механические характеристики двигателя и механизма при отрицательном (движущем) статическом моменте. Двигатель при этом создает тормозной момент. Так как отрицательный движущий момент противоположен положительному моменту статического сопротивления механизма, а с другой стороны, тормозной момент двигателя противоположен двигательному, то моменты как механизма, так и двигателя отложены вниз от оси абсцисс. При характеристиках двигателя 1 и механизма 2 состояние устойчиво, так как

$$\frac{dM}{dn} = \operatorname{tg} \alpha_{\partial} > \frac{dM_c}{dn} = \operatorname{tg} \alpha_{M_2} \text{ и } S = \frac{dM}{dn} - \frac{dM_c}{dn} > 0.$$

При случайном превышении скоростью привода установленнойся скорости  $n_c$  тормозной момент  $M$  двигателя возрастет значительно, а движущий момент механизма  $M_c$  увеличивается мало, поэтому  $M$  становится больше  $M_c$  и появляется замедляющий динамический момент, направленный противоположно движению. Под действием этого динамического момента система возвращается обратно в точку  $A$  равновесия. При характеристике

механизма 3 и характеристике двигателя состояния равновесия в точке  $A$  будет неустойчивым, так как

$$\frac{dM_c}{dn} = \operatorname{tg} \alpha_{M_1} > \frac{dM}{dn} = \operatorname{tg} \alpha_{\partial} \text{ и } S = \frac{dM}{dn} - \frac{dM_c}{dn} < 0.$$

В случае отклонения скорости привода в сторону превышения установленнойся скорости тормозной момент двигателя делается меньше момента механизма, вследствие этого появляется ускоряющий момент, и скорость привода продолжает возрастать еще больше, т. е. система удаляется от точки равновесия.

На рис. 7 приведены характеристики механизма и асинхронного двигателя, соответствующие тормозному спуску груза на сверхсинхронном торможении. Точка  $A$  соответствует устойчивой работе, так как здесь

$$S = \frac{dM}{dn} - \frac{dM_c}{dn} > 0 \left( \frac{dM}{dn} > \frac{dM_c}{dn} \right),$$

точка  $B$  — неустойчивой работе, так как в этой точке  $S < 0$ , благодаря тому, что  $\frac{dM}{dn} = \operatorname{tg} \alpha_{\partial_2} < 0$ .

## ЗА ВНЕДРЕНИЕ НОВОЙ ТЕХНИКИ

### Компактная высоковольтная аппаратура

Инж. Н. Н. ЛИННИЧЕНКО

Наркомат электропромышленности СССР

До настоящего времени аппаратом, определяющим распределительство, его размеры и характер эксплуатации, был выключатель. Поэтому естественно, что наше внимание было сосредоточено на совершенствовании выключателя.

В настоящее время обстоятельства изменились. Работа над выключателями освободила от необходимости сооружать взрывную камеру и привела к таким типам выключателей, которые уже сравниваются по своим размерам с применяемыми в настоящее время трансформаторами тока. Это уже бросается в глаза в распределителях с ВНГ-22. Но еще рельефнее это выступит, когда (если оправдаются наши предположения) мы начнем вводить смоляные выключатели, как об этом можно судить по рис. 1, на котором в одинаковом масштабе показаны смоляной 10-kV выключатель AEG, 200 MVA, и наш обычный трансформатор тока.

Дальнейший прогресс в области распределительных устройств<sup>1</sup> будет, следовательно, зависеть, главным образом, от результатов работы по созданию более компактных и удобных трансформаторов тока, а также других аппаратов высоковольтной ячейки.

**Трансформаторы тока.** Существует возможность уменьшить количество потребных трансформаторов тока на 1/3 путем введения двухполюсной защиты. К сожалению, препятствием на пути практического осуществления этой мысли являлось и до сего времени является отсутствие трансформаторов тока Ферранти для земляной защиты и, следовательно, необходимость иметь 3 трансформатора тока для земляной защиты по схеме Гольмгрина.

Следует отметить, что о трансформаторах тока Ферранти у нас говорят уже много лет и отсут-

<sup>1</sup> Распределительных сетей

ствие их до настоящего времени в номенклатуре выпускаемой аппаратуры, принимая во внимание их крайнюю простоту, можно объяснить лишь пренебрежением к новой технике со стороны заводов электроаппаратуры.

Во многих случаях возможно все же освободиться от трансформаторов тока путем применения высоковольтных реле и встроенных амперметров.

К сожалению, измерение с помощью счетчиков невозможно осуществить столь простым способом.

Следует, однако, отметить, что у нас наблюдается увлечение счетчиками, которые ставят там, где в этом нет необходимости. Несомненно, что введение первичных защит заставит пересмотреть существующие правила установки счетчиков. Но как бы там ни было, последнее не избавляет нас от необходимости рассмотреть вопрос о трансформаторе тока с точным керном для счетчика.

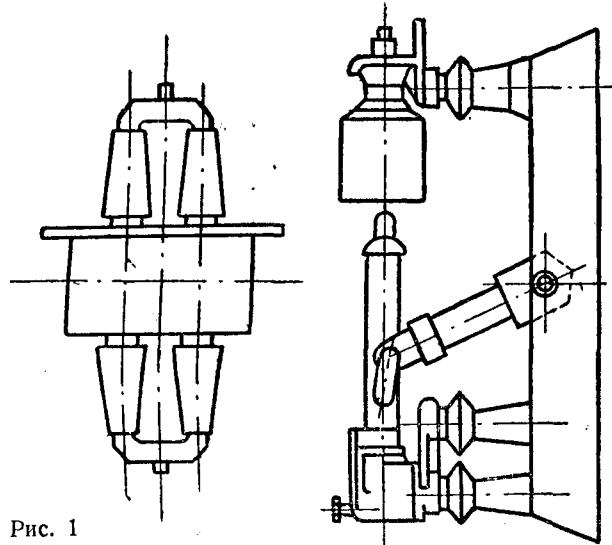


Рис. 1

Весьма эффективным средством уменьшения габаритов такого керна без снижения его качества является компенсация ошибок всякого рода искусственными схемами. Наибольшее распространение получил, повидимому, метод добавочного подмагничивания, благодаря эффективности его действия и простоте выполнения. В последнее время этот метод удалось значительно усовершенствовать [1] и добиться уменьшения веса компенсированного керна трансформатора тока в 3—6 раз по сравнению с весом керна обычной конструкции. Еще более эффективные результаты в отношении уменьшения размеров трансформатора тока можно получить за счет целесообразного решения вопросов его изоляции.

Было время, когда мы пользовались трансформатором тока по рис. 2, а не только как проходным, но и как опорным, — оба ввода можно было сделать сверху. Совершенно очевидно, однако, что использование проходного трансформатора в качестве опорного (в новых распределительных устройствах целесообразно применять именно опорные трансформаторы) нецелесообразно. Совершенно естественно в последнем случае убрать нижнюю часть трансформатора тока и перейти к конструкции по рис. 2, б; еще целесообразнее конструкция по рис. 2, с. У нас налаживается производство последней из названных конструкций. Наши опорные трансформаторы тока получаются громоздкими, потому что они имеют два керна. При одном же керне и применении описанной конструкции опорные трансформаторы тока должны получиться достаточно компактными.

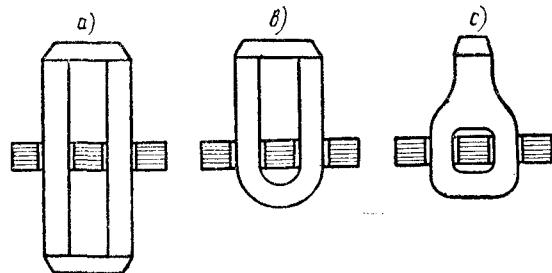


Рис. 2

Однако намечаются пути получения еще более компактных трансформаторов тока. Перспективы открываются в связи с возможностью идеального, в диэлектрическом и механическом отношениях, склеивания фарфора [2]. Пробивная электрическая и механическая прочности склеенного места получаются не меньше, чем самого фарфора.

Рис. 3 дает представление о том, чего можно достичь, воспользовавшись возможностью такого склеивания фарфора.

На рис. 3, а показан обычный трансформатор тока проходного типа, на рис. 3, б — склеенный трансформатор с керном внутри фарфора. Это конструктивное решение позволяет значительно уменьшить<sup>1</sup> внутренний диаметр керна в трансформаторе, следовательно, снизить его вес с одновременным улучшением качества благодаря уменьшению длины магнитных силовых линий.

Далее можно уменьшить высоту фарфора, так как высота фланца меньше высоты керна.

Наконец, если отказаться от фланца, высоту трансформатора можно свести до предельного минимума — высоты керна с фарфоровой изоляцией (рис. 3, с). Это можно сделать, закрепив (склеиванием) трансформатор на сквозном опорном изолиторе; внутренней частью изолитора можно воспользоваться для вывода концов вторичной обмотки.

На рис. 4 показаны конструкции трансформаторов тока фирмы Сименс и фирмы Вальтер, подобные описанной.

В целях достижения компактности керн трансформатора (рис. 4, а) выполнен из железа с высокой начальной проницаемостью (от 40 до 80% никеля). Фирма Сименс, повидимому, не пользуется искусственными схемами, предпочитая специальные

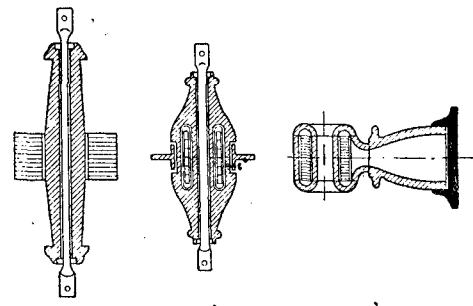


Рис. 3 а) б) в)

сорта железа и применяя их либо в чистом виде, как в описанном трансформаторе тока, либо в некоторой пропорции с обычным трансформаторным железом (Mischkern).

Можно указать еще на один метод уменьшения керна, который может быть нами применен с боль-

<sup>1</sup> В трансформаторе 3, а нельзя уменьшить диаметр керна из-за концентрации поля и, следовательно, из-за возможности появления скользящих разрядов, обуславливающих перекрытие втулки.

шим успехом, вследствие больших возможностей у нас стандартизации.

Можно отказаться от требования стандарта о разных вторичных нагрузках и считать, что трансформатор тока нагружен всегда одним и тем же комплектом приборов. Так, если считать, что трансформатор постоянно нагружен ваттметром, амперметром и двумя счетчиками — реактивным и активным,

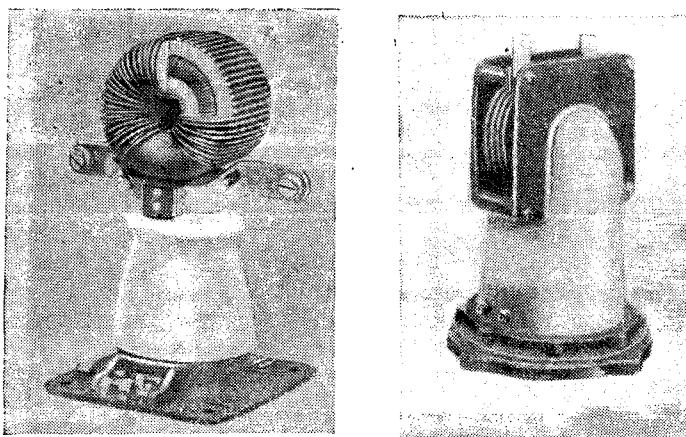


Рис. 4

то диапазон его ошибок ориентировочно будет в 2,5 раза меньше, чем это требует стандарт. Иначе говоря, из-за требований стандарта в отношении переменной вторичной нагрузки приходится увеличивать сечение керна приблизительно на 75%.

Особенно целесообразно использовать постоянство нагрузки в комплектных распределительных устройствах, поставляемых заводом. При отсутствии того или другого прибора стандартного комплекта вместо него можно для поддержания постоянства на-

**Высоковольтные реле.** Среди проектантов электрических распределительных устройств установилось мнение, что высоковольтное реле — практически малоприемлемый аппарат. Это мнение передается у нас по традиции еще со временем применения выключателей МВ-5 и МВ-12, на которых были установлены недоброкачественные, скомпрометировавшие себя реле.

Однако если бы проектанты уделили бы некоторое внимание хотя бы нашей собственной практике эксплоатации высоковольтных реле, они бы изменили свое мнение.

В наших сетях эксплуатируются высоковольтные максимальные реле заграничных фирм (например, в системе Мосэнерго их имеется свыше нескольких тысяч штук) еще старой конструкции (1915 г.). Опыт эксплоатации некоторых из них (BBC, ASEA) говорит о полной их надежности. Современные же заграничные высоковольтные реле уже весьма совершенны по своим качествам (во всяком случае они не уступают выносным реле).

Вот например, данные новых (конструкции 1936 г.) реле BBC типа НВ4 и НК4 [3].

| Технические данные<br>(при 50 Hz) | Реле<br>типа НВ4 | Реле<br>типа НК4 |
|-----------------------------------|------------------|------------------|
| Уставки тока * . . . . .          | 1,2—2            | 1,2—2            |
| Ошибка в % от тока трогания .     | $\pm 2\%$        | $\pm 2\%$        |
| Коэффициент возврата . . . . .    | 98%              | 84%              |
| Длительно допустимый ток . . .    | 1,7              | 2                |
| Допустимый односекундный ток      | 125              | 250              |
| Допустимая амплитуда . . . . .    | 500              | 1000             |
| Уставки времени в sec . . . . .   | 0 и 0,3—6        | 0 и 0,3—6        |
| Ошибка во времени в sec . . . . . | $\pm 0,1$        | $\pm 0,1$        |
| Отсечка ** при токах . . . . .    | 3—6              | 4—6              |

\* Волях от номинального тока, как и все значения тока, данные в таблице.

\*\* Реле может работать и без отсечки.

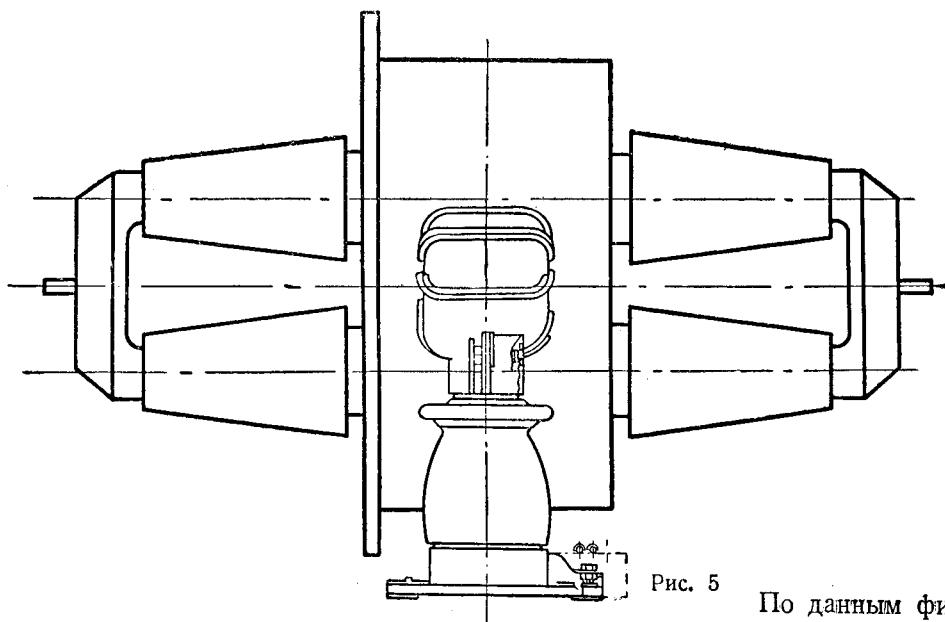


Рис. 5

грузки включать соответствующим образом подобранный дроссель.

В заключение приводим рис. 5, иллюстрирующий весьма значительную разницу между габаритными размерами проходного двухкернового трансформатора тока, применяемого нами в настоящее время, и однокернового трансформатора по рис. 4.

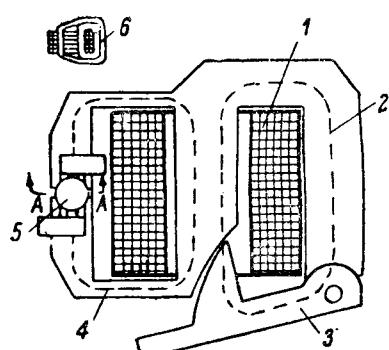


Рис. 6

По данным фирмы после типового испытания реле на миллион срабатываний его выдержка времени не изменилась и совершенно не было обнаружено каких-либо повреждений, препятствующих дальнейшей работе реле.

Как следует из приведенных данных, ступень выдержки времени при защите этим реле может быть взята 0,5 сек.

К числу положительных достоинств описываемого реле следует отнести возможность изменения всех

его уставок (тока, времени и отсечки) дистанционно, с помощью шальтштанги.

Фирма AEG выпустила высоковольтное реле, по-видимому, еще более совершенное. Фирма, например, указывает, что погрешность в выдержке времени этого реле не превышает 0,05 сек. Далее, в реле AEG более остроумно сделан и расположен в магнитной цепи синхронный моторчик типа Феррариса для выдержки времени (рис. 6).

Электромагнитный механизм реле, производящий отключение, зацепляется предварительно за зубчатую передачу моторчика и расцепляется только после того, как моторчик сделает то число оборотов, которое определяется уставкой времени; после этого электромагнитный механизм срывается с зацепления и производит отключение.

В новых реле отдали предпочтение моторной выдержке перед более простой анкерной. Это объясняется большей устойчивостью моторной выдержки по отношению к загрязнениям; реле, вообще говоря, работают редко и они подвержены запылению, влияние которого на точности выдержки оказывается тем меньше, чем больше мощность механизма выдержки. Моторная выдержка может быть сделана мощнее анкерной, поэтому ей и оказано предпочтение.

Весьма важным свойством высоковольтного реле, определяющим диапазон его применения, является термическая и динамическая устойчивость. Как известно, повышение устойчивости может быть получено за счет уменьшения ампервитков.

В реле BBC типа НК4 с повышенной устойчивостью ампервитков так мало, что у реле нехватает уже силы для отключения выключателя и приходится вводить промежуточный «крафтшпайкер». Реле действует не на собачку выключателя, а на крафтшпайкер, который уже и производит отключение.

Фирма AEG добилась той же устойчивости, что и BBC без крафтшпайкера.

Как видно из рис. 6, на котором изображена магнитная система реле AEG, моторчик включен не последовательно с якорем электромагнита З, как это сделано у BBC, а расположен в специальном шунте. Благодаря этому уменьшается магнитное сопротивление (один зазор вместо двух) и, следовательно, увеличивается магнитное поле, управляющее якорем (также и моторчиком).

Заслуживает также внимания наблюдаящаяся в последнее время тенденция (SSW, AEG) упрощения высоковольтных реле путем замены индивидуальных выдержек отдельных фазовых реле общей выдержкой времени. При этом высоковольтные реле становятся простыми максимальными реле мгновенного действия.

У AEG подобные реле при сверхтонах механически действуют (с помощью бакелитовых тяг) на промежуточное реле с анкерной выдержкой времени, которое в свою очередь тоже чисто механически с помощью крафтшпайкера отключает выключатель. SSW [5] в качестве мгновенного первичного реле сконструировал специальное «поясное реле», представляющее собой железный поясок, надевающийся на проходной изолятор. При сверхтонах магнитное поле пояска притягивает якорек, замыкающий выносное реле времени на цепь оперативного тока.

Из предыдущего следует, что из мировой электротехнической номенклатуры высоковольтное реле не выброшено, что его применяют и над ним работают.

Целесообразность такого отношения к высоковольтному реле подтверждается следующими соображениями.

Высоковольтное реле, устранив совсем или значительно уменьшая количество трансформаторов тока, экономит как трансформаторы тока, так и место, отводимое им в распределительном устройстве.

Высоковольтное реле позволяет обойтись без устройства системы оперативного тока, если применить непосредственное воздействие реле на свободное расцепление привода выключателя.

Высоковольтное реле непосредственного действия из суммы времен, составляющих ступень выдержки, вычеркивает время действия катушки расцепления, normally представляющее относительно большую величину, как это видно из приводимого баланса времен отключения:

| Время (sec)                                  |   |                          |                 |                        |         |
|--|---|--------------------------|-----------------|------------------------|---------|
| двойной<br>ошибки вы-<br>держки вре-<br>мени | действия<br>катушки<br>расцеп-<br>ления | хода в<br>контак-<br>тах | гашения<br>дуги | запаса на-<br>дежности | ступени |
| 0,1  | 0,10                                    | 0,04                     | 0,06            | 0,1                    | 0,40    |

Особенно ценно отсутствие катушки расцепления, когда необходимо быстрое мгновенное отключение. Например, применяя высоковольтное реле непосред-

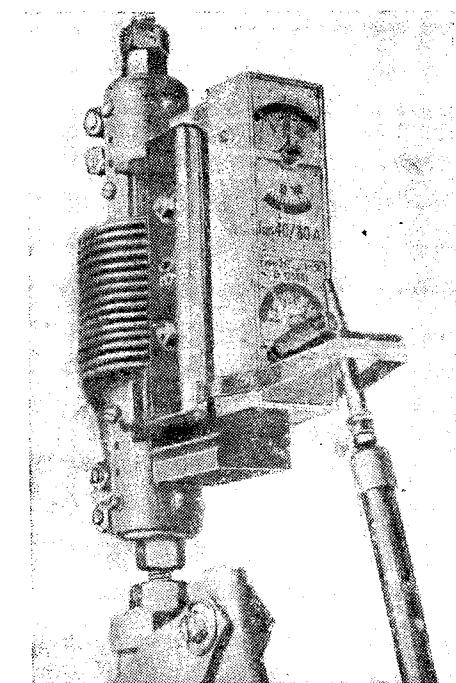


Рис. 6

ственного действия, Кауфманн сделал полное время отключения высоковольтного выключателя равным 0,05 сек.

Следующим типом высоковольтного реле является термическое реле. Это реле получило распространение в последние годы. На рис. 7 показано термическое реле [6]. Его достоинство, помимо удобства, связанных с возможностью непосредственно встраивать его в высоковольтную цепь, — хорошая тепловая характеристика. Как известно, тепловая харак-

теристика реле определяется постоянной времени его нагрева.

Постоянная времени нагрева должна быть одинаковой у реле и у защищаемого им объекта. Постоянную времени нагрева реле ВВС можно сделать равной 15, 30 или 45 min путем смены специальной подвесной части. Таким образом постоянная времени нагрева этого реле может быть подобрана очень близкой к постоянной электродвигателя, колеблющейся в пределах 25—50 min, в зависимости от мощности двигателя. На основании сказанного реле ВВС следует рассматривать, как весьма совершенный аппарат для защиты электродвигателей от опасных температур. Значительно хуже дело обстоит при применении этого реле для защиты силовых трансформаторов, имеющих большую постоянную времени нагрева до 3 h. Решение задачи о термической защите трансформаторов намечено фирмой Вестингауз [7]. Недавно фирма выпустила специальное биметаллическое реле для термической защиты трансформаторов. Реле помещается внутри трансформатора в масло и непосредственно встраивается в высоковольтную цепь. Нагрев реле Вестингауза производится током и маслом. При небольших перегрузках нагрев биметаллического элемента реле током быстро установится (постоянная нагрева элемента 15 sec) и дальнейшее повышение температуры элемента будет происходить только за счет повышения температуры масла, — кривая нагрева реле будет копировать кривую нагрева трансформатора.

Однако при больших кратковременных перегрузках реле Вестингауза будет действовать как простое биметаллическое реле, т. е. с очень малой постоянной нагрева и, следовательно, отключение трансформатора будет происходить значительно раньше необходимого срока. Выход из этого положения может быть найден в объединении идеи Вестингауза о погружении реле в масло и конструкции реле ВВС (в последнем реле большая постоянная нагрева получается за счет индукционного подогрева элемента). Таким образом реле ВВС может служить для защиты и двигателей и трансформаторов. В последнем случае его надлежит погрузить в масло защищаемого трансформатора.

**Трансформаторы напряжения.** В последние годы основные немецкие фирмы (AEG, S & H, K & St) выпустили сухие трансформаторы напряжения. Особый интерес представляет однофазный трансформатор напряжения [8] на 10 kV типа VWP-10 фирмы AEG. Небольшие габаритные размеры и возможность

устанавливать трансформатор в любом положении делают его очень удобным в компоновочном отношении. Имея такой трансформатор, можно отказаться от специальной для него ячейки, и устанавливать его в соответствующей фидерной ячейке: при этом габариты фидерной ячейки не увеличиваются. К этому надо добавить пожаробезопасность сухого трансформатора напряжения, а также отсутствие хлопот об изолирующей жидкости.

Для нас особый интерес должны представлять сухие трансформаторы напряжения с двумя изолированными выводами, поскольку такие трансформаторы должны получить применение для индивидуальных фидеров для целей автоматического резервирования, завода пружинных приводов в киосках, измерения напряжения и синхронизации.

На рис. 8 дан схематический разрез трансформатора VWP-10. Фарфоровая изоляция высоковольтной обмотки состоит из двух цилиндрических частей — внутренней 2 и внешней 1. Места соприкосновения фарфоровых частей выполнены слегка коническими, чем обеспечивается нажатие их друг на друга. Кроме того, в них имеются кольцевые пазы 3, в которые заливается компаунд через отверстия, предусмотренные для этой цели в наружном фарфоровом цилиндре. По данным фирмы, выполненный таким образом шов, при наличии компаунда надлежащего качества (диэлектрическая постоянная равна диэлектрической постоянной фарфора, высокая электрическая прочность и надлежащая текучесть), вполне обеспечивает изоляцию высоковольтной обмотки от корпуса.

Весьма трудной, далее, задачей является междувитковая изоляция в трансформаторе напряжения, поскольку в отличие от трансформаторов тока он имеет весьма значительное число витков — 10 000 при 10 kV (ориентировочно 1000 витков на 1 kV). Диаметр проволоки колеблется в пределах 0,1—0,3 mm и наложить на нее изоляцию надлежащей толщины, конечно, невозможно без непомерного увеличения габаритов трансформатора. Поэтому обычно (S & H, K & St) обмотка заливается компаундом под вакуумом.

Однако компаунд делает трансформатор пожароопасным и пригодным только для установки на полу. Ввиду этого фирма AEG разработала специальный технологический процесс, при котором компаундируется сама проволока в процессе намотки. При этом потребляется очень небольшое количество компаунда и вместе с тем обеспечивает

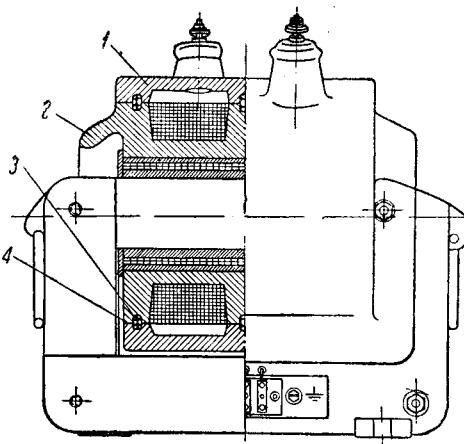


Рис. 8

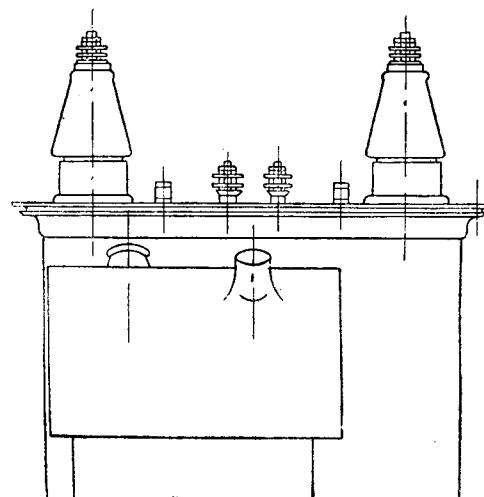
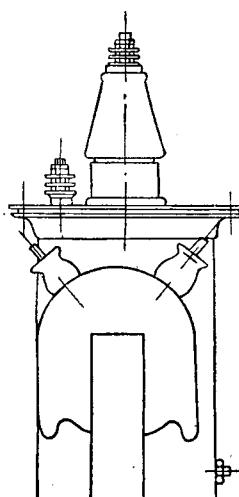


Рис. 9



ся полное отсутствие в обмотке воздушных включений.

Минимальная импульсная прочность такой обмотки — 110 kV (волна 0,5/50  $\mu$  sec по VDE 0450/1933 г.) равна импульсной прочности нормаль-

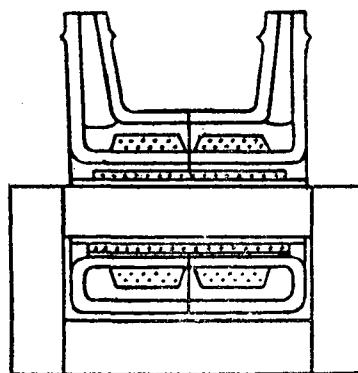


Рис. 10

ного проходного изолятора на 10 kV. Измерение тангенса угла потерь, являющееся лучшим контрольным средством качества изоляции, показало высокие изоляционные качества рассматриваемых трансформаторов напряжения. Испытательное напряжение их равно 42 kV при 10 kV номинальных.

Сопоставление габаритных размеров нашего трансформатора напряжения НОМ-10 с ВВР-10 произведено на рис. 10. Мощность нашего трансформатора НОМ-10 в 1,5 раза меньше, а вес в 1,5 раза больше.

На рис. 10 показана схема, согласно которой сконструированы трансформаторы напряжения S & H и K & St. Фарфоровая оболочка составная — из двух одинаковых половин. S & H производит склеивание оболочки по способу, описанному выше, а K & St механически стягивает обе фарфоровые половины, заполняя неровности в местах соприкосновения лаком. Последний способ соединения фарфора требует еще добавочной изоляции шва.

Выбор фарфорового чехла того или другого устройства для реализации у нас подобных конструкций может быть, конечно, произведен только на базе тщательного изучения технологии изготов-

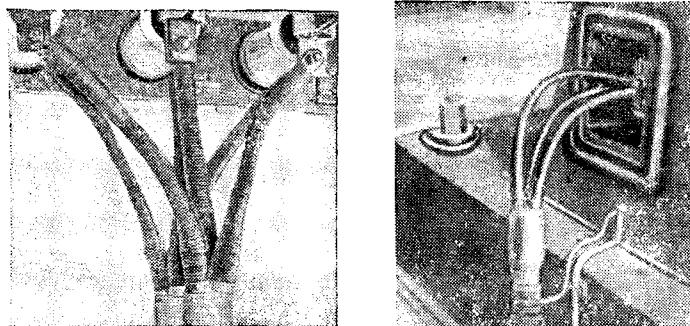


Рис. 11

ления и склеивания фарфора, а также результатов испытания. Однако независимо от выбора типа фарфора желательно, чтобы высоковольтная обмотка была такой, как у AEG — с минимумом компаунда и возможностью монтажа трансформатора в любом положении.

**Кабельные муфты.** Существенное значение в компоновке ячейки распределительного устройства

имеет кабельная муфта. С введением новой компактной аппаратуры значение муфты еще больше возрастет и в том виде, в котором она в настоящее время существует, она будет иногда препятствовать принятию наиболее желательных компоновочных решений.

Недостатками нашей муфты являются: громозд-

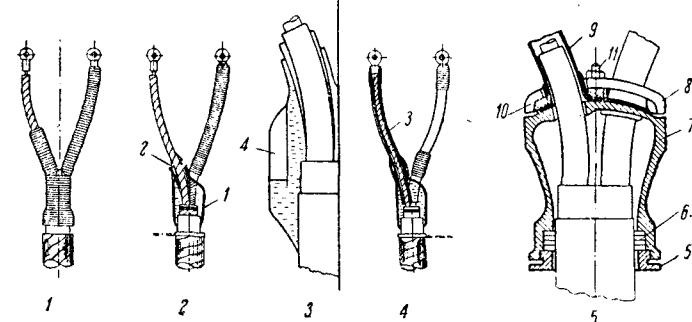


Рис. 12

кость и возможность монтажа только в вертикальном положении. Кроме того, наличие в ней сравнительно большого количества компаунда представляет угрозу в пожарном отношении, особенно вследствие весьма сильного дымообразования, которым сопровождается горение компаунда.

За границей уже больше десятилетия применяются сухие кабельные разделки на напряжения до 60 kV.

На рис. 11 показаны устройства с сухими разделками, иллюстрирующие их монтажные достоинства [9]. Как видно, можно отказаться от специальных сборок при подключении двух и даже больше параллельных кабелей (рис. 11, a), и достаточно просто подвести напряжение к двигателю (рис. 11, b).

В течение 10 лет своего существования сухая разделка претерпела известную техническую эволюцию. Рис. 13 иллюстрирует эту эволюцию.

Первоначально производилась сухая разделка 1 (рис. 13). Кабель освобождался от свинца и поясной изоляции на длину, безопасную в отношении перекрытия с кабельного наконечника на свинец, и жилы его разводились. После этого освобожденная часть кабеля тщательно обматывалась кембриковой лентой, сверху ленты покрывались стойким против различных атмосферных влияний лаком, еще выше обматывались пропитанным противогнилостным составом хлопчатобумажным шнуром, поверх которого накладывался последний слой лака. В таком виде разделка сложна и ее выполнение требует искусных рук. Кроме того, в эксплуатации эта разделка показала себя плохо. При нагреве кабеля через разделку просачивалась масса, на место которой при охлаждении проникал воздух, и разделка пробивалась. Возникла задача — воспрепятствовать вытеканию кабельной массы и упростить монтаж разделки.

Казалось, что конструкция 2 (рис. 12) решает одновременно обе поставленные задачи. В ней на кабель надевается свинцовая перчатка 1 с тремя пальцами, припаиваемая в нижней части к свинцовой оболочке кабеля и заливаемая кабельной массой.

Обматывается кабель так, как и в разделе 1. Однако как это понятно, обматывание теперь значительно упрощается, так как обматываются только отдельные жилы и нет необходимости обматывать их в месте разветвления.

Одновременно, место разветвления — самая ненадежная часть по отношению к просачиванию —

становится абсолютно надежной, получив свинцовое уплотнение. К сожалению, опыт показал, что и в этой разделке могут быть случаи просачивания массы через обмотки отдельных жил. Радикальным средством борьбы с просачиванием является устройство в свинцовой перчатке воздушной подушки 11, предоставляющей массе некоторую возможность расширения. Назовем разделку 3 (рис. 13) с воздушной подушкой эластичной.

Эластичная разделка значительно улучшает качество муфты, и, таким образом, задачей дальнейшего прогресса становится упрощение разделки с монтажной точки зрения. В последнем отношении после свинцовой перчатки большое значение имеет введение эластичной изолирующей трубки вместо ленточно-веревочной изоляции отдельных жил [10]. Как видно из схематического чертежа 4 (рис. 13) изолирующая трубка укрепляется только по концам с помощью шпагата.

Наконец, наиболее совершенной является разделка по ориентировочной конструктивной схеме 5 (рис. 13) [11]. Эта разделка целиком сборная — нет никаких припаиваний и бандажей. Нижнее уплотнение в ней создается с помощью сальника 5—6; трубы 9 уплотняются с помощью крышки из пластмассы 8, которая надевается на две шпильки, запрессованные в пластмассовой муфте 7. Крышка притягивается гайками 11 и с помощью эластичных прокладок 10, нажимающих на отбортованные фланцы трубок, создает необходимое уплотнение. Заполнение муфты массой производится настолько, чтобы масса несколько прошла в трубы. Остающийся зазор между трубками и жилами играет роль эластичной подушки, уменьшающей давление в кабеле. Уплотнение изолирующих трубок у кабельных наконечников производится не бандажами, а специальными браслетами.

Следует отметить, что немецкая аварийная стати-

стика [12] приводит цифры, указывающие на то, что концевая муфта (к сожалению, конструкции муфт не указаны) является сравнительно аварийным местом. Так, ее аварийность эквивалентна аварийности 1 км кабеля и превосходит в 5—10 раз аварийность соединительной муфты. По сравнению с американскими концевыми муфтами аварийность немецких в 3,5 раза выше.

Ввиду этого освоение новых муфт должно производиться с большой осторожностью на базе тщательных экспериментов.

**Заключение.** Наша электропромышленность до сего времени не уделяла внимания компактной высоковольтной аппаратуре (трансформатор тока Ферранти, компактные измерительные трансформаторы тока, сухие трансформаторы напряжения, высоковольтные реле максимальные и тепловые, встроенные амперметры, сухие раздатки). Дальнейшее отставание на этом участке будет термозить развитие дешевых, и в особенности компактных распределительных устройств. Введение в эксплуатацию новых компактных выключателей весьма остро ставит вопрос о соответствующем пересмотре и всей прочей аппаратуры высоковольтной ячейки.

#### Литература

1. Bull. SEV, стр. 366, № 16, 1937.
2. ATM, стр. Т 95, № 25, 1938.
3. BBC-Nachrichten, № 3, 1936.
4. AEG-Mitt., № 3/4, 1940.
5. Siem. Zeitschr. № 8, 1939.
6. ETZ, стр. 211, № 9, 1938.  
Е и. М., стр. 362, № 28, 1938.
7. El. Eng. № 8, 1939.
8. ATM, № 95, 1939.
9. Siem. Zeitschr. стр. 95, № 2, 1931.
10. Е и. М., № 31, 1936.
11. AEG-Mitt., стр. 93, № 3, 1937.
12. El. Wirtschaft, статьи Zimmermann за ряд лет.

## Мощные трансформаторы с регулируемым под нагрузкой напряжением

Инж. Ю. С. КРОНГАУЗ

Московский трансформаторный завод им. Куйбышева

Из известных в настоящее время методов регулирования напряжения под нагрузкой преимущественное распространение в энергетике получил, вследствие своей надежности и сравнительной простоты, метод изменения коэффициента трансформации трансформатора путем изменения числа витков одной из его обмоток. Получающееся при этом ступенчатое изменение напряжения практически не представляет неудобств.

Плавное изменение величины напряжения может быть достигнуто путем изменения величины магнитного потока, охватывающего обмотку. Этот принцип используется в ряде конструкций трансформаторов с подвижными ярмами, катушками, сердечниками и т. п. и в трансформаторах с подмагничиванием постоянным током.

Вследствие большого расхода активных материалов в одних конструкциях и сравнительной сложности других трансформаторы с плавным регулированием напряжения в энергетике распространения

не получили и используются, главным образом, для специальных целей и в лабораторной практике.

В статье кратко рассмотрены основные принципиальные положения о трансформаторах со ступенчатым изменением коэффициента трансформации.

**Схемы регулирования напряжения.** Ступенчатое регулирование напряжения под нагрузкой можно осуществить переключением числа витков основного силового трансформатора или путем включения специального вольтодобавочного трансформатора также с переменным коэффициентом трансформации.

Следующие схемы в основном охватывают все виды регулирования напряжения под нагрузкой путем изменения коэффициента трансформации:

- 1) силовой трансформатор со встроенным регулированием напряжения (схема *a*, рис. 1), 2) регулировочный автотрансформатор или трансформатор (схемы *b* и *c*) и 3) регулировочный агрегат бустер-трансформатор, состоящий из регулировочного ав-

тотрансформатора (или трансформатора) и серийного трансформатора ( $d$ , рис. 1).

Трансформатор по схеме  $a$  осуществлен в виде силового трансформатора, имеющего регулировочные ответвления, переключаемые посредством специальной аппаратуры под нагрузкой. Трансформаторы по схемам  $b-d$  — вольтодобавочные трансформаторы, включаемые в линию для целей регулирования напряжения по величине или фазе.

Аппаратура, осуществляющая переключение, включена последовательно в цепь обмотки и должна быть рассчитана на полный ток и напряжение обмотки, витки которой она переключает.

При напряжениях выше 110 кВ или больших токах порядка 1500—2000 А аппаратура переключения под нагрузкой получается столь сложной, что встраивать ее в силовой трансформатор весьма затруднительно.

В этих случаях, а также при необходимости регулирования под нагрузкой напряжение там, где уже имеются силовые трансформаторы, неприспособленные для этого, наконец, при необходимости иметь добавочное, регулируемое напряжение, сдвинутым по фазе относительно основного, применяются вольтодобавочные бустер-трансформаторы с регулируемым под нагрузкой коэффициентом трансформации.

Для напряжений выше 110 кВ и токов более 1500—2000 А, с точки зрения конструкции аппаратуры переключения и обмоток, более удобной является схема бустер-трансформатора, разновидность которой показана на схеме  $d$ . Бустер состоит из двух трансформаторов с раздельными магнитными системами, серийного трансформатора, включаемого в рассечку линии, напряжение которой регулируется, и регулировочного трансформатора, питающего серийный.

Для уменьшения расхода активных материалов в трансформаторах с регулируемым под нагрузкой напряжением, главным образом в вольтодобавочных, применяют реверсирование, т. е. обратное включение регулировочной обмотки.

Реверсирование при симметричной регулировке позволяет уменьшить в два раза расход материала в регулировочной части обмотки за счет некоторого усложнения аппаратуры переключения.

В таблице даны исходные формулы, позволяющие сделать приблизительное сравнение общего расхода активных материалов (медь и трансформаторная сталь) для данных выше схем вольтодобавочных трансформаторов.

| Схема   | Типовая мощность                        |
|---|---|
| Вольтодобавочный трансформатор или автотрансформатор, схемы $b, c$          | $\frac{(n+T)p}{200}$                    |
| То же, с реверсированием регулировочной части обмотки $n = \frac{T}{2} + 1$ | $\frac{P}{np/100}$                      |
| Бустер-трансформатор, схема $d$ . . .                                       | $(k \frac{n+T}{2} + n) \frac{P_p}{100}$ |
| То же, с реверсированием регулировочной обмотки . . . . .                   | $(1+k) np \frac{P}{100}$                |

В таблице приняты следующие обозначения:  $n$  — максимальное число ступеней регулирования с од-

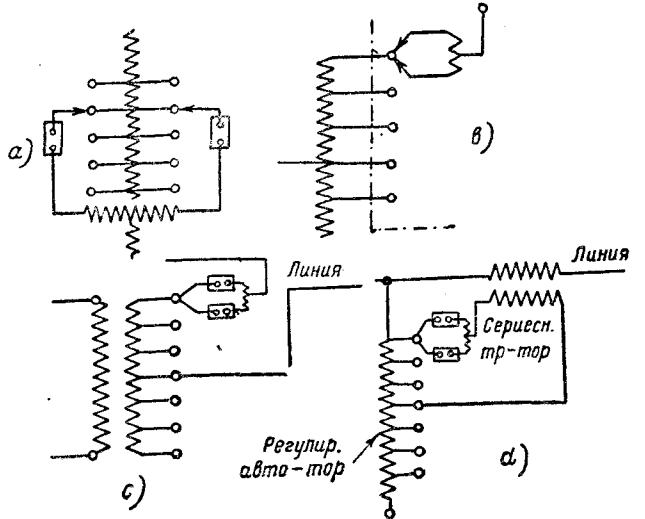


Рис. 1

*a* — схема обмотки силового трансформатора со встроенным регулированием напряжения; *b* — регулировочный автотрансформатор; *c* — регулировочный трансформатор; *d* — бустер-трансформатор

ним знаком (+ или -);  $p$  — процент напряжения каждой ступени;  $T$  — полное число ступеней (весь диапазон регулирования);  $k$  — коэффициент выгодности автотрансформатора;  $P$  — мощность регулируемой линии.

Вольтодобавочные трансформаторы применяются как для регулирования напряжения в фазе, так и под углом к основному.

Второй метод получил большое распространение в связи с усложнением конфигурации электрических сетей, в которых экономическое распределение нагрузки между отдельными элементами системы не всегда совпадает с ее естественным распределением и в ряде случаев требуется ее искусственное регулирование. Для этой цели в рассечку кольцевой линии включается регулирующий трансформатор, напряжение которого создает уравнительные токи в линии. Уравнительный ток будет отставать от добавочного напряжения на импедансный угол кольца  $\phi$ , по которому он протекает.

Например, для перераспределения активных токов необходимо приложить добавочное напряжение, опережающее основное на угол  $\phi$  или  $180^\circ + \phi$ , в зависимости от того, нужно ли увеличить или уменьшить ток в цепи, в которую включен бустер.

Поворот вектора напряжения на  $90^\circ$ ,  $60^\circ$  или  $30^\circ$ , как это видно из схемы рис. 2, получается путем комбинации соединений в звезду и треугольник.

Импедансный угол системы, как правило, не равен этим удобно получающимся углам поворота. Кроме того, он изменяется по величине в зависимости от конфигурации сети в данный момент. Поэтому обычно регулировочное напряжение дается в виде двух взаимно-перпендикулярных напряжений, величины которых регулируются самостоятельно, что позволяет получить напряжение, повернутое относительно основного на любой необходимый угол. Конструктивно выполнение вольтодобавочных трансформаторов для регулирования напряжения под углом к основному не представляет затруднений.

**Сравнение расхода активных материалов и потерь в схемах регулирования.** Вольтодобавочные трансформаторы можно включить как со стороны низшего, что наиболее экономично, так и со стороны высшего напряжения (рис. 3). Обычно низ-

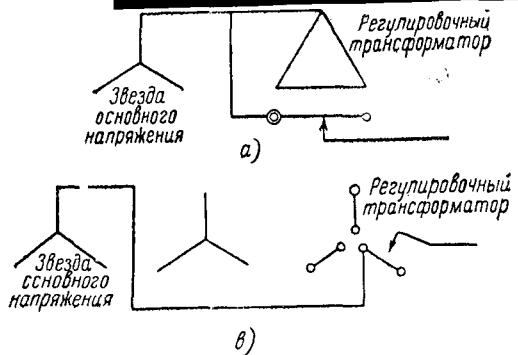


Рис. 2  
а — схема поворота добавочного напряжения на  $90^\circ$ ; б — то же, на  $60^\circ$

шее напряжение поддерживается практически постоянным, и включение вольтодобавочного трансформатора на низшем напряжении при передаче энергии с шин в линию ведет к перевозбуждению силового повышающего трансформатора. Такой способ включения может быть допущен только в случаях, когда силовой трансформатор допускает перевозбуждение, или если по конкретным условиям работы сети его нет.

В бустер-трансформаторах, где включение с низшего напряжения не позволяет силовой трансформатор, можно включить серийный трансформатор в линию высокого, а питание регулировочного производить от низкого напряжения 6—10 kV.

Система вольтодобавочный — силовой трансформатор менее экономична, чем силовой трансформатор со встроенным регулированием напряжения под нагрузкой.

Для двухобмоточных силовых трансформаторов с вольтодобавочными трансформаторами увеличение расхода материалов достигает 30—35% с одновременным увеличением потерь на 25—30% по сравнению со случаем силовых трансформаторов со встроенным регулированием напряжения под нагрузкой. Для трехобмоточных трансформаторов увеличение расхода материалов достигает 20—25% при увеличении потерь на 20—25%.

Установка отдельного вольтодобавочного трансформатора влечет за собой увеличение подстанции, следовательно, удороожает ее и требует установки дополнительной коммутационной аппаратуры и усложняет схему защиты.

Значительную долю стоимости трансформаторов с переключением под нагрузкой составляет стоимость аппаратуры переключения, растущая с увеличением тока и напряжения.

По изложенным соображениям вольтодобавочные трансформаторы следует применять при токах и напряжениях, выходящих за пределы одноименных параметров для аппаратуры переключения, встраиваемой в трансформаторы, и при специальных требованиях, удовлетворение которых чрезмерно усложняет силовой трансформатор (поперечное регулирование, большое число ступеней и широкий диапазон регулирования и т. д.).

**Методы включения вольтодобавочных трансформаторов.** Максимальное значение мощности, передаваемой через систему силовой — регулировочный трансформатор, ограничивается величиной тока, которым могут быть нагружены оба трансформатора. Для схем рис. 3, принимая, что оба трансформатора могут работать на всех напряжениях, находящихся в диапазоне регулировки, и что напряжение на генераторных шинах поддерживается постоянным, получим по условиям длительной нагрузки следующие величины передаваемой мощно-

сти в зависимости от направления передачи энергии и знака добавочного напряжения. Схема а, рис. 3 — передаваемая мощность не зависит от знака добавочного напряжения и направления передачи энергии и равна номинальной мощности силового трансформатора. Схемы б, с — при передаче энергии от генератора в линию передаваемая мощность будет  $P \left(1 \pm \frac{np}{100}\right)$ , где  $P$  — номинальная мощность силового трансформатора, а  $pr$  — процент регулирования; при передаче энергии с линии на генераторные шины передаваемая мощность будет  $P \left[1 \pm \left(-\frac{np}{100}\right)\right]$ .

Перейдем к рассмотрению устойчивости вольтодобавочных трансформаторов при к. з. Разобъем случаи к. з. на две группы: к. з. ограничено суммой импедансов системы, силового и вольтодобавочного трансформаторов; к. з. ограничено только суммой импедансов системы и вольтодобавочного трансформатора.

К первой группе относятся к. з. на шинах, поддающихся от линии к трансформаторам.

В этом случае ток к. з. ограничен импедансом 10—15%. Даже принимая мощность системы бесконечной, можно в этом случае обеспечить достаточную динамическую и термическую устойчивость вольтодобавочных трансформаторов.

Значительно сложнее обстоит дело при к. з. второй группы. При к. з. на шинах между силовым и вольтодобавочным трансформатором и наличии питания со стороны линии ток к. з., протекающий через вольтодобавочный трансформатор, будет ограничен суммой импедансов вольтодобавочного трансформатора и системы.

Импеданс вольтодобавочного трансформатора, отнесенный к напряжению линии, составляет довольно малую величину, — для бустер-трансформаторов она колеблется от 1 до 3%, для автотрансформаторов от 0 до 1% (для диапазона регулирования  $\pm 10\%$ ). Естественно, при столь малых величинах импедансов токи к. з. в сколь-нибудь мощных системах получаются настолько большими, что исключают возможность построения не только динамически, но и термически устойчивой конструкции.

Произведенные расчеты показывают, что при бесконечной мощности системы вольтодобавочный трансформатор достигает при к. з. предельных температур в течение десятых долей секунды, а автотрансформатор — в течение сотых долей секунды, т. е. за время, недостаточное для отключения к. з. защитой.

Если конструктивные мероприятия могут в какой-то степени повысить механическую устойчивость вольтодобавочного трансформатора, то увеличения термической устойчивости можно достигнуть только либо за счет снижения тока к. з., либо за счет дополнительного расхода меди и активной стали. Как известно, термическая устой-

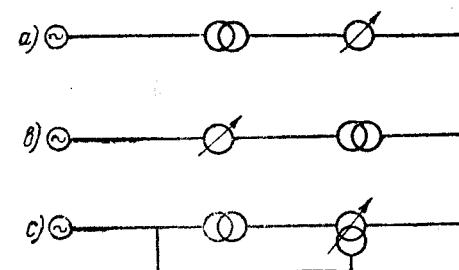


Рис. 3. Однолинейные схемы включения вольтодобавочных трансформаторов

чивость при заданной кратности тока к. з., пропорциональна весу меди, и, следовательно, получение достаточной устойчивости вольтодобавочных трансформаторов за счет конструктивных мероприятий требует увеличения расхода меди в несколько раз.

Ясно, что единственной реальной мерой, повышающей устойчивость вольтодобавочных трансформаторов, является снижение токов к. з., протекающих по ним.

Наиболее эффективным методом снижения токов к. з. является включение вольтодобавочных трансформаторов в нейтраль силовых (рис. 4). В этом

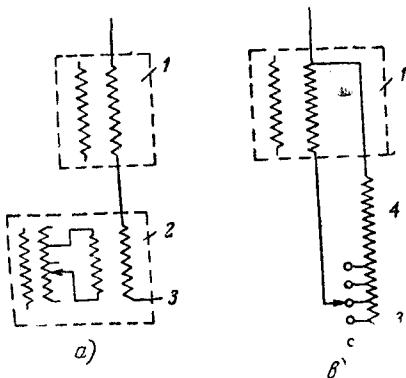


Рис. 4. Однолинейные схемы включения бустер-трансформатора (а) и автотрансформатора в нейтраль (б)  
1 — силовой трансформатор, 2 — бустер-трансформатор, 3 — нейтраль, 4 — вольтодобавочный автотрансформатор

случае к. з. на шинах между вольтодобавочным и силовым трансформаторами ограничивается импедансом вольтодобавочного трансформатора, отнесенным к его собственной мощности, т. е. величиной порядка 10—25% или же импедансом основного трансформатора.

При невозможности включить вольтодобавочный трансформатор в нейтраль силовых трансформаторов и токах к. з., не позволяющих построить устойчивый вольтодобавочный трансформатор, необходимо добиться снижения тока к. з. даже путем включения реакторов.

Изложенное выше заставляет, как правило, требовать включения вольтодобавочных трансформаторов в нейтраль силовых. В исключительных случаях, при включении вольтодобавочных трансформаторов в линию, ударный ток к. з. должен быть не более 25—30  $I_n$ , где  $I_n$  — эффективное значение номинального тока.

**Процесс и схемы переключения.** Основное требование, предъявляемое к процессу переключения, — это отсутствие разрыва тока в главной цепи при изменении коэффициента трансформации.

Переход с одного ответвления одинарной обмотки на другое без разрыва тока в питаемой сети может быть осуществлен только путем промежуточного одновременного соединения двух регулировочных ответвлений между собой. На рис. 5 показана последовательность перехода с одного ответвления на другое. Для ограничения тока секции обмотки, замыкаемой в момент переключения, служит токоограничивающее омическое или индуктивное сопротивление.

В положении моста (положение 3 на рис. 5) по обмотке трансформатора протекает геометрическая сумма части нагрузочного тока  $I_n$  и циркулирующего  $I_c$ , протекающего через токоограничивающее сопротивление.

Пренебрегая внутренним сопротивлением секции обмотки, замкнутой на токоограничивающее сопротивление, получим величину тока, протекающего по обмотке, как геометрическую сумму половины нагрузочного и циркулирующего токов.

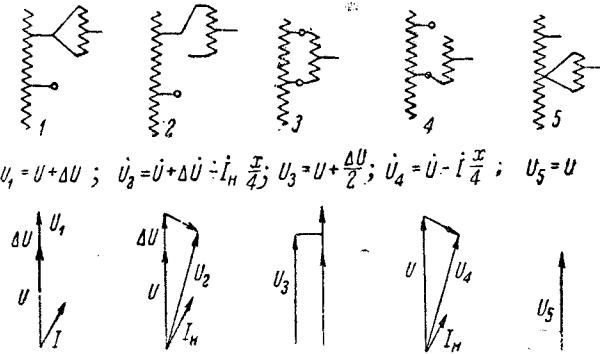


Рис. 5

Токоограничивающее сопротивление должно быть выбрано так, чтобы

$$\left| \frac{I_n}{2} + I_c \right| \leq I_n$$

Выполнение этого условия исключает угрозу перегрузки обмотки трансформатора в случае какой-либо аварии с переключающим механизмом.

На рис. 6 дана векторная диаграмма для случая регулирования напряжения на вторичной стороне трансформатора, когда циркулирующий ток является вторичным.

В положениях 2, 3 и 4 рис. 5 по обмоткам реактора протекает полный рабочий ток. Обмотки реактора могут быть рассчитаны на 3 различных режима работы: 1) кратковременная работа в течение цикла переключения, в рабочем положении реактор шунтируется, 2) длительная работа при половинном токе и 3) длительная работа при номинальном токе.

Изготовление реактора для третьего режима даст тот выигрыш, что в случае порчи приводного механизма вследствие стопорения в промежуточном положении, когда через реактор проходит полный нагружочный ток, трансформатор не требует отключения и может длительно работать. Увеличение стоимости всего регулировочного устройства при этом незначительно. Мощность реактора равна мощности одной ступени, что составляет 2—2,5% мощности силового трансформатора со встроенной регулировкой и около 6—10% мощности бустер-трансформатора.

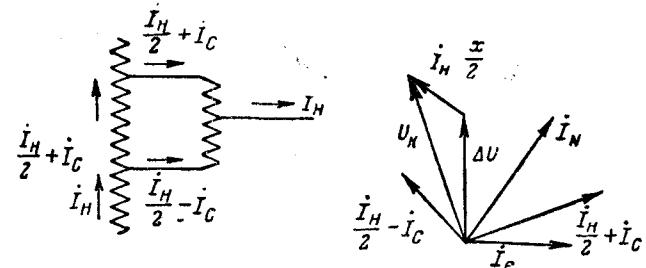
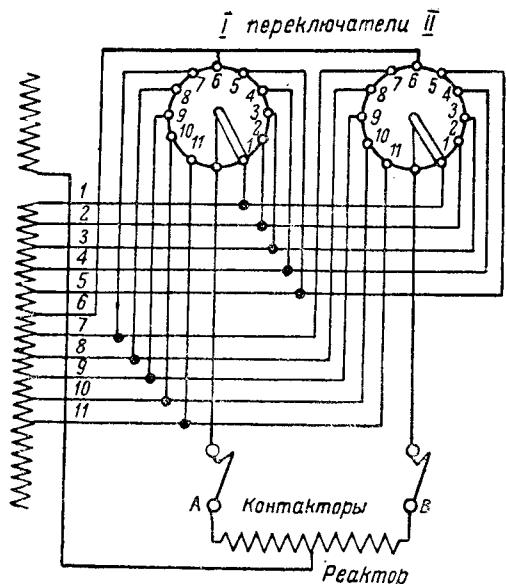


Рис. 6. Диаграммы токов и напряжений для реактора ( $U_n$  — напряжение на контакте в момент разрыва дуги)

форматоров и автотрансформаторов. Естественно, что некоторое уменьшение расхода материала на реактор за счет уменьшения общей надежности схемы, вследствие невозможности работы в промежуточных положениях, нецелесообразно<sup>1</sup>.

В отличие от индуктивного, омическое токоограничивающее сопротивление не может быть вклю-

<sup>1</sup> Токоограничивающие реакторы в трансформаторах Московского трансформаторного завода им. Куйбышева по этим соображениям рассчитаны на длительную работу в промежуточных положениях.



| Положения  | 1 |   |   |   |   | 2 |
|------------|---|---|---|---|---|---|
| Перекл. I  | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Перекл. II | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| Контакт А  | ● |   |   | ● | ● | ● |
| Контакт В  | ● | ● | ● | ● |   | ● |

● - Контактор замкнут

Рис. 7

чено в цепь нагрузочного тока в рабочем положении. Сопротивление используется только в момент замыкания секции между переключателями и шунтируется или отключается посредством добавочных контакторов в рабочем положении. Выполнение сопротивления,ющего длительно работать в промежуточных положениях, невозможно из-за больших потерь в нем.

Невозможность построить сопротивление, способное сколько-нибудь длительно работать в промежуточных положениях, заставляет делать их весьма компактными, рассчитанными на нагрузку в течение долей секунд и максимум секунд.

Если геометрическая сумма нагрузочного и циркулирующего токов обмотки в положении моста равна или меньше ее номинального тока, — применение токоограничивающего омического сопротивления, рассчитанного на кратковременную нагрузку, не вызывает непосредственной опасности для обмоток самого трансформатора при порче аппаратуры переключения. Для предохранения масла от порчи при застревании механизма переключения в промежуточном положении и для облегчения схемы и ремонта сопротивления оно должно быть вынесено из кожуха трансформатора и помещено в отдельный бачок.

Омическое сопротивление нашло широкое распространение особенно в Европе. Это объясняется его малыми габаритами, что позволяет легко осуществлять переключение на напряжениях 100 kV, помещая сопротивление вместе с контактором на бушинге.

При переходе со ступени на ступень контакты переключателей, совершающих эту операцию, разрывают и включают токовые контуры под нагрузкой.

Можно принять, что мощность на контактах равна двойной мощности переключаемой ступени трансформатора. Экспериментально установлено, что в рассматриваемом диапазоне токов и напря-

жений и для применяемых конфигураций контактов их сгорание пропорционально току в степени 1,2 и напряжению в степени 0,8, таким образом сгорание материала контакта  $f = kI_n^{1,2}(2AU)^{0,8}$ , где  $k$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от материала и конструктивных параметров контактов.

На основании сказанного легко подсчитать мощность, разываемую контактами аппаратурой. Для крупных силовых и вольтодобавочных трансформаторов она измеряется величинами порядка 1000 kVA. Разрыв таких мощностей сопровождается уже значительным обгоранием контактов. Число переключений, особенно при автоматическом управлении аппаратурой переключения, также достаточно велико, достигая в некоторых случаях 60—100 в день. Учитывая эти обстоятельства, в аппаратуре переключения для силовых и вольтодобавочных трансформаторов от 3000—5000 kVA принято разделять функции переключения — выбора ступени и разрыва дуги, чтобы избежать необходимости смены большого числа контактов всех ступеней регулирования, что усложнило и удоро- жило конструкцию аппаратуры.

Разрыв дуги осуществляется специально сконструированными для этой цели контакторами, сам же переключение — переход со ступени на ступень — производит обесточенный переключатель, контакты которого в силу этого не подвержены обгоранию.

На рис. 7 дана схема такой усложненной аппаратурой переключения, схема дана для одной фазы. Эта схема идентична изображенной на рис. 5 принципиальной схеме. Последовательность переключения видна из таблички рис. 7.

Аппаратура, построенная по схеме рис. 7, изготавливается Московским трансформаторным заводом им. Куйбышева для трехфазных силовых трансформаторов мощностью от 7500 до 40 000 kVA для непосредственного переключения ответвлений обмоток напряжением до 35 kV включ. и для вольтодобавочных трансформаторов транзитной мощностью от 6000 до 120 000 kVA на все освоенные напряжения (до 220 kV). Требующаяся очередность движения переключателей и контакторов достигается соответственной механической передачей между переключателями и контакторами<sup>2</sup>.

При монтаже трансформаторов необходимо весьма тщательно проверять правильность последовательности действия контакторов и переключателей. При неверной последовательности работы разрыв дуги произойдет на переключателях, контакты которых для этого совершенно неприспособлены, благодаря чему могут иметь место серьезные повреждения переключателей и самого трансформатора.

Механизм аппаратуры переключения (приводной механизм) приводится в движение электромотором постоянного или переменного тока. Преимущество привода на постоянном токе — легкое и весьма надежное осуществление торможения.

Точность и быстрота торможения являются основным условием, предъявляемым к приводному механизму. Неправильное, несвоевременное торможение может привести к поломке переключающей аппаратуры и аварии трансформатора.

<sup>2</sup> Конструкция аппаратуры более подробно описана в статье автора в журнале „Электрические станции“ № 4, 1935.

Приводные механизмы мощных трансформаторов Московского трансформаторного завода им. Куйбышева приводятся в движение двигателями постоянного тока мощностью 0,5—1 кВт. Управление приводными механизмами осуществляется дистанционно, со щита управления кнопкой, или же автоматически — от реле напряжения.

**Перспективы развития трансформаторов с регулируемым под нагрузкой напряжением и опыт их эксплуатации.** В рассматриваемой области актуальной является задача создания новых типов трехфазной аппаратуры на 110 кВ и однофазной, для однофазных трансформаторов больших мощностей (20 кВА в фазе и больше) на напряжение 35 кВ и ниже, а также конструктивное усовершенствование существующих типов.

В качестве специальной задачи стоит внедрение регулирования под нагрузкой в специальные типы трансформаторов — для электропечей и ртутно-выпрямительных установок. Работы в этом направлении уже проводятся и в случае необходимости такие трансформаторы могут быть построены. Необходимо также форсировать работу по изысканию новых методов регулирования напряжения, не требующих применения сложной аппаратуры переклю-

чения. Ведущиеся в настоящее время работы в этой области случайны, непланомерны и не привели к реальным результатам.

Основной и ближайшей задачей ближайшего будущего является расширение объема производства трансформаторов с переключением под нагрузкой. Ряд ведущих заграничных заводов строит подавляющее количество своих мощных трансформаторов (до 70—80%) с переключением под нагрузкой, мы же в этой области отстаем.

Отставание по производству описываемых типов аппаратуры влечет за собой снижение технического уровня энергетики, худшее использование трансформаторов и сужение маневренной способности энергосистем.

Причиной этого положения вещей является отсутствие производственной базы для изготовления аппаратуры переключения под нагрузкой. Поэтому основной задачей является создание такой базы достаточной мощности на Московском трансформаторном заводе им. Куйбышева. Наличие производственной базы позволит широко внедрить трансформаторы с переключением под нагрузкой в энергетику и тем самым повысить экономичность и надежность работы наших энергосистем.

## Переходные процессы при торможении противотоком асинхронных двигателей

Доц. М. А. ЭСИБЯН

Азербайджанский индустриальный институт им. Азизбекова

**Основные уравнения и положения.** Всякий переходный электромагнитный процесс может быть представлен путем наложения на токи установленногося режима уравнительных токов.

Как известно<sup>1</sup>, пренебрегая насыщением, предполагая синусоидальное распределение индукции в зазоре, можно получить следующие выражения для уравнительных токов в статоре и роторе (при замкнутых обмотках и врачащемся роторе):

$$i_{f_1} = A_1 e^{-a_r t} \cos qt + A_2 e^{-a_s t} \cos pt, \quad (1a)$$

$$i_{f_2} = A_3 e^{-a_r t} \cos pt + A_4 e^{-a_s t} \cos qt. \quad (1b)$$

ражения для токов в фазах 2 и 3 ротора и фазах II и III статора аналогичны с (1a), (1b) и отличаются сдвигом на угол  $\frac{2}{3}\pi$  или  $\pm\frac{4}{3}\pi$ .

В уравнениях (1)  $i_{f_1}$  — уравнительный ток фазы 1 ротора,  $i_{f_2}$  — то же, фазы I статора,  $A_1, A_4$  — постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий,  $a_s$  и  $a_r$  — коэффициенты затухания, определяющие вещественной частью корней характеристического уравнения,  $p$  и  $q$  — круговые частоты свободных токов, определяющиеся как мнимая часть корней характеристического уравнения,  $t$  — время.

При неподвижных обмотках возникающие при коммутационных процессах уравнительные поля остаются неподвижными. При врачающемся роторе возникающее в воздушном зазоре уравнительное поле разделяется между статором и

ротором и каждая часть увлекается с небольшой скоростью вокруг обмотки, с которой оно связано. В случае короткозамкнутого ротора эти части поля вытесняются в воздух, что и обуславливает появление значительных уравнительных токов.

Системе токов с частотой  $q$  в статоре и  $p$  в роторе, затухающих с одинаковым коэффициентом затухания  $a_s$ , соответствует поле, почти неподвижно связанное со статором, так как частота  $q$  обычно весьма мала и поле движется с небольшой скоростью вокруг статора, в сторону вращения ротора.

Системе же токов с частотой  $p$  в статоре и  $q$  в роторе, затухающих с одинаковым коэффициентом  $a_r$ , соответствует поле, почти неподвижно связанное с ротором, медленно движущееся вокруг ротора в сторону, противоположную его вращению. Для случая короткозамкнутого ротора можно полагать  $a_s \approx a_r$ , причем

$$a_s = \frac{\omega R_s}{\omega L_s} \approx \omega \frac{R_s}{X_{sk}}, \quad (2a)$$

$$a_r = \frac{R_r}{\tau L_r} \approx \omega \frac{R_r}{X_{rk}}, \quad (2b)$$

$$\nu = \frac{\omega}{2} + \sqrt{U} \approx \omega, \quad q = \frac{\omega}{2} - \sqrt{U} \approx 0,$$

$$U = \sqrt{\left(\frac{\omega}{2}\right)^2 - \nu(1-\nu)}.$$

Здесь  $R_s$  и  $R_r$  — активные сопротивления одной фазы статора и ротора в  $\Omega$ ,  $\tau$  — коэффициент общего рассеяния Блонделя:  $\tau = 1 - \frac{1}{(1+\tau_s)(1+\tau_r)}$ ,  $\tau_s$  и  $\tau_r$  — коэффициенты рассеяния Гейланда,  $X_{sk}$  — реактан-

<sup>1</sup> И. Бирман. Сверхтоки в установках высокого напряжения. ОНТИ 1932.

к. з., измеренный со стороны статора,  $X_{rk}$  — тоже, со стороны ротора.

Постоянны интегрирования для случая короткозамкнутого ротора определяются:

$$A_1 = \frac{i_{10}}{\tau} + \frac{i_{10}}{\tau} \frac{M}{L_r} = \frac{i_{10}}{\tau} + \frac{i_{10}(1-\tau)}{\tau} \frac{L_s}{M} = \frac{i_{10}}{\tau} + \frac{i_{10}(1-\tau)(1+\tau_s)}{\tau} \frac{L_{0s}}{M}, \quad (3a)$$

$$A_2 = -\frac{i_{10}}{\tau} (1-\tau) - \frac{i_{10}}{\tau} \frac{M}{L_r} = -\frac{i_{10}(1-\tau)}{\tau} - \frac{i_{10}(1-\tau)(1+\tau_s)}{\tau} \frac{L_{0s}}{M}, \quad (3b)$$

$$A_3 = -\frac{i_{10}}{\tau} \frac{M}{L_s} - \frac{i_{10}(1-\tau)}{\tau} = -\frac{i_{10}(1-\tau)}{\tau} - \frac{i_{10}(1-\tau)(1+\tau_r)}{\tau} \frac{L_{0R}}{M}, \quad (3c)$$

$$A_4 = \frac{i_{10}}{\tau} + \frac{i_{10}}{\tau} \frac{M}{L_s} = \frac{i_{10}}{\tau} + \frac{i_{10}(1-\tau)(1+\tau_r)}{\tau} \frac{L_{0R}}{M}, \quad (3d)$$

$$\left[ L_s = L_{0s}(1+\tau_s), L_r = L_{0r}(1+\tau_r), M^2 = L_{0s}L_{0r}, \tau = 1 - \frac{M^2}{L_sL_r} \right].$$

В уравнениях (3)  $i_{10}$  — начальное значение уравнительного тока в роторе для  $t=0$ ;  $i_{10}$  — начальное значение уравнительного тока в статоре,  $\frac{L_{0r}}{M} \approx \frac{K_r w_r}{K_s w_s}$  — коэффициент трансформации (приведения роторных токов к статорным),  $\frac{L_{0s}}{M} \approx \frac{K_s w_s}{K_r w_r}$  — то же, но для приведения статорных токов к роторным.

Начальные значения уравнительных токов определяются согласно общему коммутационному закону из условия:

$$i_{y_{cm}} + i_{y_p} = i_{\partial_k} \text{ при } t=0, \quad (4)$$

$i_{y_{cm}}$  — установившийся ток при  $t=0$ ,  $i_{y_p}$  — уравнительный,  $i_{\partial_k}$  — ток, предшествовавший коммутации.

**Торможение короткозамкнутых двигателей.** Процесс торможения противотоком происходит следующим образом: статор отключается от сети и затем вновь включается на сеть так, чтобы вращающееся поле изменило свое вращение на противоположное.

При отключении статора существующее в зазоре поле связывается неподвижно с ротором и начинает затухать.

В момент включения ротор вращается со скоростью  $\omega \approx \omega_s$  в сторону, противоположную вращению установившегося поля (в дальнейшем будем для краткости писать — навстречу полю), и обладает затухающим свободным полем, оставшимся после отключения. Это поле может быть представлено уравнением:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\frac{t}{T}}, \quad (5)$$

где  $\Phi_0$  — начальное значение потока, равное нормальному потоку машины в зазоре, и  $T = \frac{L_r}{R_r}$  — постоянная времени главного поля машины.

Этому полю соответствуют экспоненциально затухающие постоянные токи в фазе I ротора:

$$i_1 = I_{0r} \cos \phi e^{-\frac{t}{T}}. \quad (6)$$

Выясним условия наиболее неблагоприятного протекания уравнительного процесса при торможении противотоком.

В данном случае, очевидно, мы имеем одновременное протекание двух уравнительных процессов.

Один процесс обусловлен включением на сеть статора при встречно вращающемся роторе. Возникающее при включении уравнительное поле разделяют между собой обмотки статора и ротора. Для этого процесса важно также отметить участие полей рассеяния, которые весьма значительны в рассматриваемом случае встречно вращающегося и корот-

козамкнутого ротора. Необходимо также иметь в виду связи с этим, что поле в зазоре значительно меньше, чем нормальное.

Второй процесс обусловлен наличием свободного поля ротора. Включение статора на сеть воспринимается полем ротора как к. з. статора (статор замыкается через сеть сопротивление которой незначительно по сравнению с сопротивлением статора) и уравнительный процесс протекает так же, как он протекал бы при действительном к. з.

Таким образом поле ротора, очутившись между двумя замкнутыми системами обмоток, вызывает уравнительный процесс, аналогичный уравнительному процессу от включения статора.

В конечном итоге, результирующий уравнительный процесс определяется величиной общего уравнительного поля в зазоре в момент включения, т. е. геометрической суммой уравнительного поля от включения статора и поля ротора.

Когда оба эти поля совпадают по направлению в момент включения, уравнительный процесс будет сопровождаться наиболее сильными толчками тока; если поля противоположны, имеем наиболее благоприятный случай включения.

Так как уравнительное поле статора противоположно в пространстве установившемуся полю в момент включения, то, очевидно, что наиболее неблагоприятный случай имеет место, когда установившееся поле включаемого статора противоположно свободному полю ротора в момент включения.

Пусть установившийся ток в фазе I статора

$$i_I = I''_{0s} \cos(\omega t + \varphi_0 + \psi_1) - I_1 \sin(\omega t - \varphi_2 + \psi_1) \quad (7a)$$

и в фазе I ротора

$$i_1 = I_1 \sin(2\omega t - \varphi_2 + \psi_1). \quad (7b)$$

$I''_{0s}$  — амплитуда намагничивающего тока статора; в дальнейшем, учитывая, что поле в зазоре меньше нормального, мы должны считать  $I''_{0s} = K I_{0s}$ , где  $K = \frac{\tau_r}{\tau}$  — доля рассеяния ротора от общего рассеяния;

$I_1$  — амплитуда тока в роторе, равная приблизительно току к. з.  $I_{0r}$ ;

$I_{0s}$  — амплитуда намагничивающего тока, соответствующая нормальному потоку;

$I'_1$  — составляющая тока статора, компенсирующая ампервитки ротора;

$\varphi_3$  — угол сдвига фаз между э. д. с. и током ротора;

$\varphi_0$  — угол сдвига фаз между намагничивающим током и потоком;

$\psi_1$  — начальный угол.

Примем, что в момент включения  $\psi_1 = -\varphi_0$  и учтем, что  $\varphi_0 + \varphi_2 \approx -\frac{\pi}{2}$ , тогда имеем следующие значения установившихся токов в статоре и роторе для момента включения ( $t=0$ ):

$$i_{10_{y_{cm}}} = I''_{0s} + I'_1 \text{ и } i_{10_{y_p}} = -I_1.$$

Токи, предшествовавшие коммутации, в статоре равны нулю ( $i_{10_{\partial_k}} = 0$ ), а в роторе [см. (6)]:

$$i_{10_{\partial_k}} = I_{0r} \cos \phi e^{-\frac{t_p}{T}},$$

где  $t_p$  — собственное время действия реверсора,  $\phi$  — угол, характеризующий положение поля ротора относительно статора.

Примем, что в момент включения ось фазы I ротора совпадает с осью фазы I статора.

Из начальных условий включения статора очевидно, что амплитуда установившегося поля при  $t=0$  совпадает с осью фазы I статора.

Из рассмотренных выше условий неблагоприятного и благоприятного случая протекания уравнительного процесса следует, что первый случай соответствует  $\phi = \pi$ , ибо при этом ток в фазе I ротора имеет амплитудное значение, противоположное намагничивающему установившемуся току при  $t=0$ , следовательно, противоположны также положения поля ротора и установившегося поля.

На основании уравнения (4) получаем, что начальное значение уравнительного тока статора

$$i_{10} = -I''_{0s} - I'_1, \quad (8a)$$

ротора

$$i_{10} = I_{0r} \cos \phi e^{-\frac{t_p}{T}} + I_1. \quad (8b)$$

С помощью уравнений (3) получаем значения постоянных  $A_1 - A_4$ :

$$A_1 \approx -\frac{I_{0r}''}{\tau} + K I_1 + \frac{I_{0r}}{\tau} \cos \phi e^{-\frac{t_p}{T}}, \quad (3a')$$

$$A_3 \approx \frac{I_{0r}''}{\tau} + I_1(1-K) - \frac{I_{0r}}{\tau} \cos \phi e^{-\frac{t_p}{T}}, \quad (3b')$$

$$A_3 \approx \frac{I_{0s}''(1-\tau)}{\tau} - K I'_1 - \frac{I_{0s}}{\tau} \cos \phi e^{-\frac{t_p}{T}}, \quad (3c')$$

$$A_4 \approx -\frac{I_{0s}''}{\tau} - (1-K) I'_1 + \frac{I_{0s}}{\tau} \cos \phi e^{-\frac{t_p}{T}}. \quad (3d')$$

Здесь  $I_{0r}'' = \frac{I_{0s}'' L_{0s}}{M}$  — намагничающий ток, приведенный к ротору.

Подставив эти значения в уравнения (1), сложив полученные уравнительные токи с установившимися уравнения (7) и заменив  $I_{0s}''$  через  $K I_{0s}$ , получим переходные токи в статоре и роторе:

$$\begin{aligned} i_{1nep} &= I_1(1-K)e^{-a_s t} \cos pt + \frac{K I_{0r}}{\tau} e^{-a_s t} \cos pt + \\ &+ I_1 K e^{-a_r t} \cos qt - \frac{K I_{0r}}{\tau} e^{-a_r t} \cos qt - \\ &- \frac{I_{0r}}{\tau} [(1-\tau) \cos pte^{-a_s t} - e^{-a_r t} \cos qt] \cos \phi e^{-\frac{t_p}{T}} - \\ &- I_1 \cos 2\omega t, \end{aligned} \quad (9a)$$

$$\begin{aligned} i_{Inep} &= -K I'_1 \cos pte^{-a_r t} + \frac{K I_{0s}(1-\tau)}{\tau} e^{-a_r t} \cos pt - \\ &- (1-K) I'_1 e^{-a_s t} \cos qt - \frac{K I_{0s}}{\tau} e^{-a_s t} \cos qt - \\ &- \frac{I_{0s}}{\tau} [\cos pte^{-a_r t} - \cos qte^{-a_s t}] \cos \phi e^{-\frac{t_p}{T}} + \\ &+ (I_0'' + I_1') \cos \omega t. \end{aligned} \quad (9b)$$

В полученных выражениях первые 4 члена обусловлены уравнительным процессом от включения статора при встречно врашающемся роторе, члены, взятые в квадратные скобки и умноженные на  $\cos \phi e^{-\frac{t_p}{T}}$ , вызваны уравнительным процессом свободного поля ротора, оставшимся после выключения, и, наконец, последние члены представляют установившиеся токи.

Учитывая, что при короткозамкнутом и встречно врашающемся роторе ( $s \approx 2$ ),

$$I_1 \approx I_{kr}, \quad \frac{I_{0r}}{\tau} \approx \frac{U_{0r}}{X_{kr}} \approx I_{kr},$$

также  $I_1' \approx I_{ks}$ , можно упростить выражения (9):

$$\begin{aligned} i_{1nep} &\approx I_{kr} e^{-a_s t} \cos pt - I_{kr} [(1-\tau) e^{-a_s t} \cos pt - \\ &- e^{-a_r t} \cos qt] \cos \phi e^{-\frac{t_p}{T}} - I_{kr} \cos 2\omega t, \end{aligned} \quad (9a')$$

$$\begin{aligned} i_{Inep} &\approx -I_{ks} e^{-a_s t} \cos pt - I_{ks} [e^{-a_r t} \cos pt - \\ &- e^{-a_s t} \cos qt] \cos \phi e^{-\frac{t_p}{T}} + I_{ks} \cos \omega t. \end{aligned} \quad (10)$$

Не считаясь для наглядности с затуханием при  $t = \frac{\pi}{p} \approx \frac{\pi}{\omega} = 0,01$  sec, получим для неблагоприятного момента следующие максимальные значения переходных токов в роторе и статоре —  $i_{1nep\max} = 4I_{kr}$ ;  $i_{Inep\max} = 4I_{ks}$ . Однако даже у очень крупных электродвигателей коэффициенты затухания  $a_s$  и  $a_r$  значительны и подобные толчки тока никогда не достигаются. На основании приближенных формул (2) эти коэффициенты определяются соотношением между активным сопротивлением соответствующей обмотки и реактивной к. з.

Для крупных машин мощностью 100—1000 kW,  $\frac{R_s}{X_{ks}} \frac{R_r}{X_{kr}} = 0,05 \div 0,1$  и  $a_s = a_r = 0,85 \div 0,73$ . Для машин средней

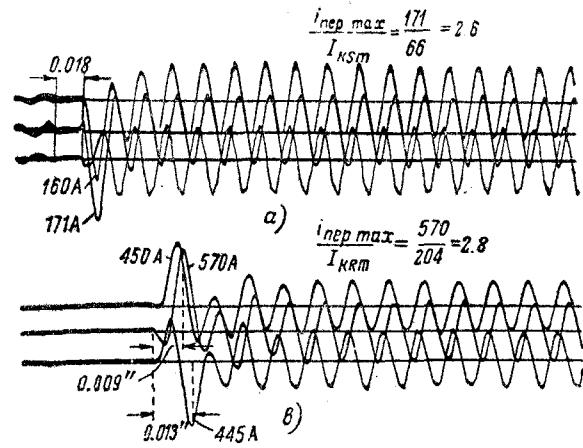


Рис. 1. Осциллограммы токов при реверсировании асинхронного короткозамкнутого двигателя в неблагоприятный момент включения

а — токи статора, б — токи ротора

мощности — 10 kW — 100,  $a = 0,73 + 0,62$ ; для мелких машин<sup>2</sup> ( $1 \div 10$  kW)  $a = 0,62 \div 0,89$ .

Затухание свободного поля ротора, определяющееся величиной  $e^{-\frac{t_p}{T}}$ , оказывается незначительно, так как постоянная времени главного поля  $T$  обычно исчисляется десятками долями секунды, а время  $t_p$  между отключением и включением — сотнями долей секунды.

Возможные с учетом затухания толчки тока, вычисленные по уравнениям, приведены в таблице (принято  $e^{-\frac{t_p}{T}} = 0,95$ ):

| Мощность двигателя, kW | Постоянная времени затухания $T_s = \frac{1}{a}$ sec | Максимальные значения кратности токов $\frac{i_{nep\max}}{I_k}$ |
|------------------------|--|---|
| 1000—100               | 0,065—0,03   | 3,50—3,1  |
| 100—10                 | 0,03—0,02  | 3,1—2,8   |
| 10—1                   | 0,02—0,01  | 2,8—2,2   |

Как видно из таблицы, толчки тока весьма значительны и могут достичь 3,5-кратной амплитуды тока к. з. Одна о времена существования уравнительных токов сравнительно невелико, они затухают быстро (ибо постоянная времени их затухания определяется индуктивностью рассеяния машины).

На рис. 1 приведены осциллографы токов в статоре и роторе, снятые при реверсировании асинхронного двигателя мощностью 7,4 kW, 220/380 V, 1430 об/мин, типа ТА-41/4 с фазным ротором. Ротор был короткозамкнут.

Не лише указать, что из множества осциллографов выбраны для рис. 1 осциллографы с наибольшими толчками тока. Эксперимент производился при пониженном напряжении — 210  $\div$  220 V ввиду малой мощности лабораторной сети.

Для нашего двигателя  $\frac{1}{T_s} = a \approx \frac{R_s}{X_{st}} \omega = \frac{0,5 \cdot 314}{2,7} = 57$ . По формулам (9) отношение максимальных толчков тока к току к. з.

$$\frac{i_{nep\max}}{I_k} = 2,65.$$

Получившиеся по осциллографам толчки тока довольно хорошо подтверждают сделанные выше выводы.

На рис. 2 приведены осциллографы токов статора, снятые при реверсировании электродвигателя с короткозамкнутым ротором мощностью 5,44 kW, 380 V, 730 об/мин.

Для этого двигателя  $a = 40$ ,  $I_{ks} = 54 \sqrt{2} = 76$  A. По расчету для неблагоприятного момента  $\frac{i_{nep\max}}{I_{ks}} \approx 2,94$  на осциллографе получилось 2,78.

Реверсирование производилось приnomинальном напряжении.

<sup>2</sup> Приведенные пределы — ориентировочные.

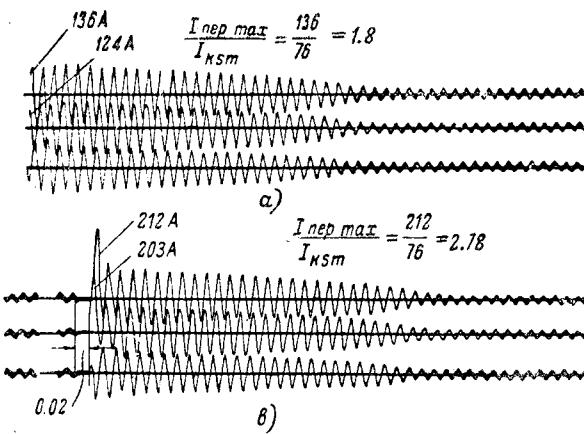


Рис. 2. Осциллографы токов в статоре при реверсировании короткозамкнутого двигателя  
а — неблагоприятный момент, б — благоприятный момент включения

**Торможение двигателей с фазным ротором.** При торможении противотоком и реверсе асинхронных двигателей с фазным ротором обычно в цепь ротора вводится большое сопротивление с целью ограничения толчков тока и получения надлежащего момента.

Рассмотрим сначала неустановившийся процесс подключения статора к сети при встречно врачающемуся роторе, в который введено большое сопротивление.

Когда статор подключается к сети, всегда возникает неподвижное поле (как при включении с неподвижным разомкнутым ротором). Так как в роторе сопротивление большое, то поле уже не разделяется между статором и ротором, как это было при короткозамкнутом роторе, а остается почти целиком связанным с более „сильной“ в магнитном отношении обмоткой статора.

Как и при включении с разомкнутым ротором, в статоре появляется уравнительный намагничивающий ток, во много раз превышающий нормальный намагничивающий ток, вследствие насыщения магнитной цепи.

В роторе составляющие намагничивающего тока ничтожны и уравнительный ток определяется, главным образом, током, индуцированным неподвижным затухающим полем статора. Так как ротор вращается со скоростью, близкой к синхронной  $\omega_s$ , то этот уравнительный ток будет синусоидально колеблющийся с круговой частотой  $\approx \omega_s$  и затухает с той же постоянной, что и неподвижное уравнительное поле статора.

Исходя из этих соображений, переходный ток в роторе можно приблизительно выразить так:

$$I_t = -I_r \cos 2\omega t + I'_r e^{-a_s t} \cos \omega t, \quad (11)$$

где  $I_r \approx \frac{2E_{2H}}{\sqrt{(2X_2)^2 + R_s^2}}$  — амплитуда установившегося тока;  
 $E_{2H}$  — амплитуда э. д. с., индуцируемой в неподвижном роторе установившимся полем;  
 $I'_r \approx \frac{E_{2H}}{\sqrt{X_2^2 + R_s^2}}$  — начальная амплитуда уравнительного тока, индуцируемого уравнительным неподвижным полем статора.

Уже при  $R_r \gg 4X_2$  (что обычно имеет место)  $I'_r = 0.5 I_r$ . Постоянная затухания  $a_s \approx \frac{1}{T}$ , где  $T$  — постоянная времени главного поля.

Приблизительно ток статора

$$I_t = I'_r \cos \omega t - I'_r e^{-\frac{t}{T}}. \quad (12)$$

Значения  $I'_r$  должны определяться по магнитному состоянию машины с учетом насыщения, вызываемого наложением неподвижного уравнительного поля на установившееся врачающееся поле.  $T$  во время переходного процесса не постоянно, а изменяется в связи с изменением насыщения машины.

Легко усмотреть, что в рассматриваемом случае толчки

переходных токов получаются значительно меньшими. Гораздо более опасны возникающие в роторе перенапряжения.

Каждый виток обмотки ротора пронизывается полем

$$\Phi_r = \Phi e^{j\omega_s t} = \Phi_0 e^{j(\omega_s + \omega_2)t} - \Phi_0 e^{(j\omega_2 - \frac{1}{T})t}. \quad (13)$$

Индуктируемое в одной фазе ротора напряжение

$$e_r = -w_r \frac{d\Phi_r}{dt} = -w_r j (\omega_s + \omega_2) \Phi_0 e^{j(\omega_s + \omega_2)t} - \\ - \left( j\omega_2 - \frac{R_s}{L_s} \right) w_r \Phi_0 e^{\left( j\omega_2 - \frac{R_s}{L_s} \right)t}. \quad (14)$$

Установившееся напряжение, индуцируемое в роторе, определяется первым членом этого уравнения и может быть выражено (полагая  $\omega_2 \approx \omega_s$ ):

$$e_1 = E_m \cos(2\omega t + \phi), \quad (15)$$

где

$$E_m \approx 2w_r \omega_s \Phi_0 = 2E_{2H}.$$

Второй член представляет напряжение, индуцированное уравнительным затухающим неподвижным полем статора,

$$e_{yp} = \sqrt{\omega_2^2 + \left( \frac{R_s}{L_s} \right)^2} w_r \Phi_0 e^{-\frac{R_s}{L_s} t} \cos(\omega_2 t + \phi_1) = \\ = E_{yp} \cos(\omega_2 t + \phi_1), \quad (16)$$

где

$$E_{yp} = \sqrt{\omega_2^2 + \left( \frac{R_s}{L_s} \right)^2} w_r \Phi_0 e^{-\frac{R_s}{L_s} t}.$$

В первый момент включения установленное и уравнительное поле сдвинуты на угол  $\pi$ . Поэтому можно окончательно представить уравнение (14):

$$e_r = e_1 + e_{yp} = E_m \cos(\omega_s + \omega_2)t + E_{yp} \cos(\omega_2 t + \pi). \quad (17)$$

Таким образом на установленное напряжение, пульсирующее приблизительно с двойной частотой (в начале процесса), накладывается напряжение, индуцируемое уравнительным полем, пульсирующее приблизительно с нормальной частотой.

В неблагоприятном случае, когда амплитуды установленного и уравнительного напряжения совпадают, получается перенапряжение, приблизительная величина которого, пренебрегая затуханием, будет:

$$\frac{E_m + E_{yp}}{E_m} = \frac{\sqrt{\omega_2^2 + \left( \frac{R_s}{L_s} \right)^2} + 2\omega_s}{2\omega_s} = 1.5. \quad (18)$$

Таким образом в начале процесса в роторе получаются напряжения, в 1,5 раза превышающие установленное э. д. с. Так как эта э. д. с. почти в два раза превышает э. д. с. при неподвижном роторе, то максимальное перенапряжение составляет:

$$e_{nepmax} = 1.5 \cdot 2E_{2H} = 3E_{2H}. \quad (19)$$

Когда в ротор введено большое сопротивление, напряжение на кольцах приблизительно равно индуцируемой в роторе э. д. с., так что и напряжение на кольцах в неблагоприятном случае достигает почти трехкратного значения.

На рис. 3 представлена осциллограмма напряжения на кольцах, снятая при включении статора. Ротор вращался встречно и был замкнут на большое сопротивление. При эффективном значении установленного напряжения, равном 122 V, максимальное напряжение, записанное шлейфом, достигало 252 V, т. е. в 1,46 раза превышало установленное напряжение при встречно врачающемся роторе и в 2,84 раза напряжение на кольцах неподвижного ротора, равное 63 V. На осциллограмме также ясно видно, как установленное напряжение двойной частоты интерферирует с уравнительным затухающим напряжением одинарной частоты.

$$U_{nep} = 122V; U_{2H} = 63.5V; U_{kup} = 173V$$

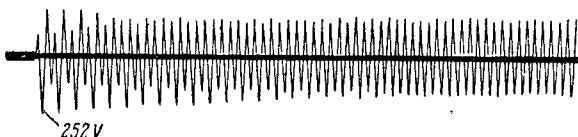


Рис. 3. Напряжение на кольцах асинхронного двигателя. Статор включается на сеть при встречно-вращающемся роторе

До сих пор мы рассматривали происходящий процесс, не считаясь со свободным полем ротора, оставшимся после выключения.

Следует отметить, что в большинстве применяемых практических схем реверсирования асинхронных двигателей с кольцами статор отключается от сети при значительном сопротивлении в цепи ротора, так что свободное поле ротора за время между отключением и включением статора успевает полностью исчезнуть. При этом получаются кратковременные перенапряжения, обычно не более чем 1,4 раза превышающие нормальные напряжения статора и ротора [1].

Если же при реверсе выключение производится при короткозамкнутом роторе, а сопротивление включается только в момент включения статора, то перенапряжения могут превзойти значения, определяемые формулой (9).

Объясняется это тем, что оставшаяся к моменту реверса часть свободного поля ротора при включении статора к сети переходит к более "сильной" обмотке статора и неподвижно связывается с ним, складываясь (в неблагоприятном случае) с возникающим уравнительным полем включения статора. Вследствие этого в роторе могут индуцироваться дополнительные напряжения, составляющие такую же долю от  $E_{up}$  [ур. (16)], какую составляет уравнительное поле ротора в момент реверса от своего начального значения.

Во всяком случае, очевидно, что максимальное перенапряжение будет не более, чем в

$$\frac{E_m + 2E_{up}}{E_m} \approx \frac{2\omega_s + 2\omega_2}{2\omega_s} \approx 2 \text{ раза}$$

превышать установленное напряжение при встречном вращающемся роторе и, следовательно, приблизительно в 4 раза — напряжение неподвижного ротора. С учетом затухания следует ожидать перенапряжений, в 3,5—3,75 раза превышающих напряжение неподвижного ротора.

Автор считает необходимым отметить, что при выполнении настоящей работы им получены ценные указания от заслуженного деятеля науки проф. С. Н. Усатого и кандидата технических наук доц. Б. М. Плющ.

## Литература

1. Р. Рюденберг. Явления неустановившегося режима в электрических установках. Москва — Ленинград, 1931.
2. И. Бирман. Сверхтоки в установках высокого напряжения. Госэнергоиздат, 1932.
3. М. А. Эсибян. Асинхронный двигатель в неустановившихся режимах. Диссертация на соискание ученой степени канд. тех. наук. Баку АЗИИ, март 1939.
4. Проф. О. Б. Брон. Переходные режимы асинхронного двигателя в связи с работой контакторов переменного тока. "Вестник ХЭМЗ" № 6, 1939.
5. L. Dreyfus. Freie magnetische Energie zwischen verketten Mehrphasensystemen E & M, стр. 891 и далее, 1911.
6. L. Dreyfus. Ausgleichsvorgänge in der symmetrischen Mehrphasenmaschine. E & M, стр. 121 и далее, 1912.

# Действие дистанционной защиты импедансного типа при двойных замыканиях на землю в компенсированной сети

Канд. техн. наук, доц. А. Б. ЧЕРНИН  
"Теплоэлектропроект"

Обеспечение правильного действия релейной защиты при двойных замыканиях на землю в компенсированных сетях представляет значительные трудности. Основное требование, предъявляемое к релейной защите при этом виде повреждений, — это отключение одного места повреждений. Согласно „Руководящим указаниям по релейной защите“ для этой цели применяется блокировка, выполненная с помощью токового реле и реле направления энергии нулевой последовательности. Однако при таком выполнении блокировка действует только на участках с  $I_0 \neq 0$ . В связи с этим возникает вопрос о селективности действия защиты на участках с  $I_0 = 0$ .

Ниже дан анализ действия дистанционной защиты импедансного типа при двойном замыкании в схеме рис. 1 на участках с  $I_0 = 0$ .

**Выражения для импедансов на клеммах реле на участках  $I_0 = 0$ .** Вывод выражений для импедансов на клеммах реле дан для трех схем присоединения защиты на участках с  $I_0 = 0$  (см. „Руководящие указания по релейной защите“, раздел 0—4). Схема A — присоединение на линейный ток и половину междуфазового напряжения (схема Сименса); при трех- и двухфазовых к. з. схема обеспечивает замер импеданса прямой последовательности  $z_1$ . Схема B — присоединение на линейный ток и междуфазовое напряжение; при трехфазных к. з. схема замеряет  $1,73 \cdot z_1$ , при двухфазных —  $2 \cdot z_1$ . Схема C — присоединение на разность линейных токов и междуфазовое напряжение.

жение; при трех- и двухфазных к. з. схема замеряет импеданс прямой последовательности  $z_1$ .

**Схема A.** Напряжение между поврежденными фазами  $B$  и  $C$  в точке  $S$  (рис. 1):

$$\begin{aligned} \dot{U}_{BCS} = & (i_{BMM1} + i_{BMN2}) Z_{MN1} + i_{MN0} Z_{MN0} + \\ & + (i_{BLN} - i_{CLN}) Z_{SN1} + 3i_{M0} R_M - 3i_{N0} R_N = \\ = & i_{BLN} Z_{MN1} + i_{M0} (Z_{MN0} - Z_{MN1}) + (i_{BLN} - i_{CLN}) Z_{SN1} + \\ & + 3i_{M0} (R_M + R_N). \end{aligned} \quad (1)$$

Импедансы на клеммах реле фаз  $B$  и  $C$  в точке  $S$  на основании (1) можно выразить следующим образом:

$$Z_{BSp} = \frac{\dot{U}_{BCS}}{2i_{BLN}} = 0,5 \left[ Z_{SM1} + \frac{i_{M0}}{i_{BLN}} (Z_{MN0} - Z_{MN1}) - \right. \\ \left. - \frac{i_{CLN}}{i_{BLN}} Z_{SN1} + \frac{3i_{M0}}{i_{BLN}} (R_M + R_N) \right]; \quad (2)$$

$$Z_{CSp} = \frac{\dot{U}_{BCS}}{2i_{CLN}} = 0,5 \left[ \frac{i_{BLN}}{i_{CLN}} Z_{SM1} + \right. \\ \left. + \frac{i_{M0}}{i_{CLN}} (Z_{MN0} - Z_{MN1}) - Z_{SN1} + \frac{3i_{M0}}{i_{CLN}} (R_M + R_N) \right]. \quad (3)$$

На основании выражений (2) и (3) можно получить выражения для импедансов на клеммах реле в предположении установки их вблизи места повреждения  $N$  ( $Z_{SN1} = 0$ ).

Выражения (2)–(3) также позволяют получить выражения, характеризующие разницу в импедансах при переходе от точки  $N$  к точке  $S$  рис. 1, в следующем виде:

$$\frac{Z_{BSP} - Z_{BNP}}{Z_{SN1}} = 0,5 - 0,5 \frac{i_{CLN}}{i_{BLN}}; \quad (4)$$

$$\frac{Z_{CSP} - Z_{CNP}}{Z_{SN1}} = 0,5 \frac{i_{BLN}}{i_{CLN}} - 0,5. \quad (5)$$

Эти же формулы (2)–(5) можно использовать для анализа импедансов участка  $KM$ , если взаимно заменить фазы  $B$  и  $C$  и величины токов и сопротивлений участка  $LN$  заменить соответствующими величинами участка  $KM$ .

**Схема Б.** В этом случае к защите фазы  $B$  подводится междуфазовое напряжение поврежденных фаз  $B$  и  $C$  и ток фазы  $B$ , а потому импедансы на клеммах реле в два раза больше, чем по выражениям (2) и (4).

Напряжение между фазами  $C$  и  $A$ , подводимое к защите фазы  $C$ , для точек  $S$  и  $Q$  рис. 1 равно:

$$\dot{U}_{CAS} = \dot{U}_{CS} - \dot{U}_{AS} = (a\dot{E}_H - i_{CLN}Z_{LS1}) - (\dot{E}_H - i_{ALN}Z_{LS1}) = \\ = (a-1)\dot{E}_H - (i_{CLN} - i_{ALN})Z_{LS1}; \quad (6)$$

$$\dot{U}_{CAQ} = \dot{U}_{CQ} - \dot{U}_{AQ} = (a\dot{E}_I - i_{CKM}Z_{KQ1}) - \\ - (\dot{E}_I - i_{AKM}Z_{KQ1}) = (a-1)\dot{E}_I - (i_{CKM} - i_{AKM})Z_{KQ1}. \quad (7)$$

Импедансы на клеммах реле фазы  $C$  в точках  $S$  и  $Q$  на основании выражений (6) и (7):

$$Z_{CSP} = \frac{\dot{U}_{CAS}}{i_{CLN}} = \frac{(a-1)\dot{E}_H}{i_{CLN}} - \left(2 + \frac{i_{BLN}}{i_{CLN}}\right)Z_{LS1}, \quad (8)$$

$$Z_{CQP} = \frac{\dot{U}_{CAQ}}{i_{CKM}} = \frac{(a-1)\dot{E}_I}{i_{CKM}} - \left(2 + \frac{i_{BKM}}{i_{CKM}}\right)Z_{KQ1}. \quad (9)$$

Последние выражения позволяют получить формулы для импедансов на клеммах реле фазы  $C$  при их установке вблизи мест повреждения  $N$  и  $M$  ( $Z_{SM1} = Z_{QM1} = Z_{MN1}$ ).

Из выражений (8)–(9) можно также получить выражения, характеризующие разницу в импедансах при переходе от точек  $N$  и  $M$  соответственно к точкам  $S$  и  $Q$ , в следующем виде:

$$\frac{Z_{CSP} - Z_{CNP}}{Z_{SN1}} = 2 + \frac{i_{BLN}}{i_{CLN}}, \quad (10)$$

$$\frac{Z_{CQP} - Z_{CMP}}{Z_{QM1}} = 2 + \frac{i_{BKM}}{i_{CKM}}. \quad (11)$$

**Схема В.** Если напряжения на клеммах реле выразить через падение напряжения от места повреждения до места установки реле [для  $U_{BCS}$  см. выражение (1)], то импедансы на клеммах

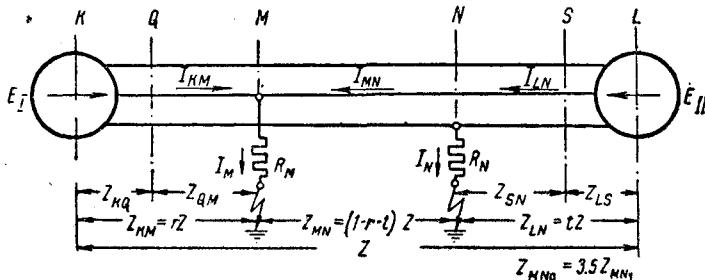


Рис. 1. Элементарная схема с двумя точками питания с двойным замыканием на землю

реле фазы  $B$  в точках  $S$  и  $Q$  можно представить в следующем виде:

$$Z_{BSP} = \frac{\dot{U}_{BCS}}{i_{BLN} - i_{CLN}} = Z_{SM1} + \frac{i_{M0}}{i_{BLN} - i_{CLN}}(Z_{MN0} - Z_{MN1}) + \\ + \frac{i_{CLN}}{i_{BLN} - i_{CLN}}Z_{MN1} + \frac{3i_{M0}}{i_{BLN} - i_{CLN}}(R_M + R_N), \quad (12)$$

$$Z_{BQP} = \frac{\dot{U}_{BCQ}}{i_{BKM} - i_{CKM}} = Z_{QM1} + \\ + \frac{i_{M0}}{i_{BKM} - i_{CKM}}(Z_{MN0} - Z_{MN1}) - \\ - \frac{i_{BKM}}{i_{BKM} - i_{CKM}}Z_{MN1} + \frac{3i_{M0}}{i_{BKM} - i_{CKM}}(R_M + R_N). \quad (13)$$

Импедансы на клеммах реле фазы  $C$  в точках  $S$  и  $Q$  в соответствии с выражениями (6) и (7):

$$Z_{CSP} = \frac{\dot{U}_{CAS}}{i_{CLN} - i_{ALN}} = \frac{(a-1)\dot{E}_H}{i_{CLN} - i_{ALN}} - Z_{LS1}; \quad (14)$$

$$Z_{CQP} = \frac{\dot{U}_{CAQ}}{i_{CKM} - i_{AKM}} = \frac{(a-1)\dot{E}_I}{i_{CKM} - i_{AKM}} - Z_{KQ1}. \quad (15)$$

На основании (12)–(15) можно получить выражения для импедансов на клеммах реле фаз  $B$  и  $C$  при их установке вблизи мест повреждения  $N$  и  $M$  ( $Z_{SM1} = Z_{QM1} = Z_{MN1}$ ).

Разность импедансов в точках  $S$  и  $N$ , а также  $Q$  и  $M$  в соответствии с (12)–(15) всегда равна импедансу прямой последовательности.

Для анализа выражений (2)–(5) и (8)–(15) необходимы соотношения между токами на участках с  $I_0 = 0$  при двойном замыкании на землю, вывод которых дан ниже.

**Соотношения между токами в схеме рис. 1 на участках с  $I_0 = 0$ .** На основании соотношений, известных из общей теории двойных замыканий на землю<sup>1</sup>, можно для схемы рис. 1 получить:

$$i_{AKM} = -i_{ALN} = i_{KM1} + i_{KM2} = \frac{\dot{E}_I - \dot{E}_H}{Z_1} + \\ + \frac{j\sqrt{3}Z_{LN1} + aZ_{MN1}}{Z_1}i_{M0} - \\ - \frac{j\sqrt{3}Z_{LN2} - a^2Z_{MN2}}{Z_2}i_{M0}, \quad (16)$$

$$i_{BKM} = a^2i_{KM1} + ai_{KM2} = a^2\frac{\dot{E}_I - \dot{E}_H}{Z_1} + \\ + \frac{j\sqrt{3}a^2Z_{LN1} + Z_{MN1}}{Z_1}i_{M0} - \frac{j\sqrt{3}aZ_{LN2} - Z_{MN2}}{Z_2}i_{M0}. \quad (17)$$

$$i_{CKM} = ai_{KM1} + a^2i_{KM2} = a\frac{\dot{E}_I - \dot{E}_H}{Z_1} + \\ + \frac{j\sqrt{3}aZ_{LN1} + a^2Z_{MN1}}{Z_1}i_{M0} - \\ - \frac{j\sqrt{3}a^2Z_{LN2} - aZ_{MN2}}{Z_2}i_{M0}, \quad (18)$$

$$i_{BLN} = a^2i_{LN1} + ai_{LN2} = a^2\frac{\dot{E}_H - \dot{E}_I}{Z_1} + \\ + \frac{j\sqrt{3}a^2Z_{KM1} - aZ_{MN1}}{Z_1}i_{M0} - \\ - \frac{j\sqrt{3}aZ_{KM2} + a^2Z_{MN2}}{Z_2}i_{M0}, \quad (19)$$

<sup>1</sup> См., например, статью автора „Электричество“ № 17–18, 1987.

$$i_{CLN} = a i_{LN1} + a^2 i_{LN2} = a \frac{\dot{E}_{II} - \dot{E}_I}{Z_1} + \\ + \frac{j\sqrt{3}a Z_{KM1} - Z_{MN1}}{Z_1} i_{MO} - \frac{j\sqrt{3}a^2 Z_{KM2} + Z_{MN2}}{Z_2} i_{MO}. \quad (20)$$

Из выражений для токов на участках  $KM$  и  $LN$  следует, что при равенстве импедансов  $Z_{KM}$  и  $Z_{LN}$  и э. д. с.  $E_I$  и  $E_{II}$  эти токи для фаз  $B$  и

с представляют сопряженные векторы. Поэтому можно ограничиться рассмотрением отношений токов с одной стороны рис. 1, например, на участке  $LN$ .

Отношения токов нулевой последовательности к полным токам в общем случае на основании выражений (16), (19) и (20):

$$\frac{i_{MO}}{i_{BLN}} = \frac{1}{a^2 \frac{\dot{E}_{II} - \dot{E}_I}{Z_1} + \frac{j\sqrt{3}a^2 Z_{KM1} - aZ_{MN1}}{Z_1} - \frac{j\sqrt{3}aZ_{KM2} + a^2Z_{MN2}}{Z_2}} \quad (21)$$

$$\frac{i_{MO}}{i_{CLN}} = \frac{1}{a \frac{\dot{E}_{II} - \dot{E}_I}{Z_1} + \frac{j\sqrt{3}aZ_{KM1} - Z_{MN1}}{Z_1} - \frac{j\sqrt{3}a^2Z_{KM2} + Z_{MN2}}{Z_2}} \quad (22)$$

$$\frac{i_{BLN}}{i_{CLN}} = \frac{a^2 \frac{\dot{E}_{II} - \dot{E}_I}{Z_1} + \frac{j\sqrt{3}a^2Z_{KM1} - aZ_{MN1}}{Z_1} - \frac{j\sqrt{3}aZ_{KM2} + a^2Z_{MN2}}{Z_2}}{a \frac{\dot{E}_{II} - \dot{E}_I}{Z_1} + \frac{j\sqrt{3}aZ_{KM1} - Z_{MN1}}{Z_1} - \frac{j\sqrt{3}a^2Z_{KM2} + Z_{MN2}}{Z_2}} \quad (23)$$

$$\frac{i_{ALN}}{i_{CLN}} = - \left( 1 + \frac{i_{BLN}}{i_{CLN}} \right). \quad (24)$$

Для частного случая, когда сопротивления прямой и обратной последовательностей равны или отношения этих сопротивлений для отдельных участков схемы рис. 1 одинаковы, из выражений (21)–(23):

$$\frac{i_{MO}}{i_{BLN}} = \frac{1}{a^2 \frac{\dot{E}_{II}\dot{E}_I}{Z_1} + \frac{3Z_{KM1} + Z_{MN1}}{Z_1}}, \quad (25)$$

$$\frac{i_{MO}}{i_{CLN}} = \frac{1}{a \frac{\dot{E}_{II} - \dot{E}_I}{Z_1} + \frac{3Z_{KM1} + 2Z_{MN1}}{Z_1}} \quad (26)$$

$$\frac{i_{BLN}}{i_{CLN}} = \frac{a^2 \frac{\dot{E}_{II} - \dot{E}_I}{Z_1} + \frac{3Z_{KM1} + Z_{MN1}}{Z_1}}{a \frac{\dot{E}_{II} - \dot{E}_I}{Z_1} + \frac{3Z_{KM1} + 2Z_{MN1}}{Z_1}}. \quad (27)$$

Ток  $i_{MO}$  в правых частях (25)–(27) может быть выражен через э. д. с. и импедансы на основании общей теории двойных замыканий на землю:

$$i_{MO} = - \frac{\dot{E}_I [j\sqrt{3}Z_{LN1} - a^2Z_{MN1}] + \dot{E}_{II} [j\sqrt{3}Z_{KM1} + aZ_{MK1}]}{6 \cdot \dot{Z}_{KM1} \dot{Z}_{LN1} + 2Z_{MN1} [Z_{KM1} + Z_{LN1}] + Z [Z_0 + 3R_M + 3R_N]}. \quad (28)$$

В выражении (28) принято, что сопротивления обратной последовательности равны сопротивлениям прямой последовательности. Отметим, что ток  $i_{MO}$  увеличивается по мере сближения точек замыкания на землю (рис. 1).

Анализ отношений токов дан ниже при условии равенства импедансов прямой и обратной последовательности; кроме того, для упрощения не учитываются активные сопротивления схемы рис. 1, включая переходные сопротивления  $R_M$  и  $R_N$ .

Для выяснения диапазона и характера изменения токов необходимо учитывать в выражениях (25)–(28) все возможные случаи двойных замыканий на землю. Для этого следует принять изменение  $r$  и  $t$  (рис. 1) в пределах  $0 \rightarrow 1$  (пределы 0 и 1 являются теоретическими).

В табл. 1 приведены отношения

$$\frac{i_{MO}}{i_{BLN}}, \frac{i_{MO}}{i_{CLN}} \text{ и } \frac{i_{BLN}}{i_{CLN}}$$

для трех случаев: а)  $\dot{E}_I = \dot{E}_{II}$ ; б)  $\dot{E}_I = 1,0$ ;  $\dot{E}_{II} = 0,75$  и в)  $\dot{E}_I = 0,75$ ;  $\dot{E}_{II} = 1,0$ .

При взаимной замене  $r$  и  $t$  и э. д. с.  $E_I$  и  $E_{II}$  из

таблицы можно также получить абсолютные величины отношений

$$\frac{i_{MO}}{i_{BKM}}, \frac{i_{MO}}{i_{CKM}} \text{ и } \frac{i_{CKM}}{i_{BKM}}$$

соответственно из выражений:

$$\frac{i_{MO}}{i_{CLN}}, \frac{i_{MO}}{i_{BLN}} \text{ и } \frac{i_{BLN}}{i_{CLN}}.$$

Из выражений (25)–(28) и табл. 1 следует:

1. Отношения токов нулевой последовательности к полным токам фаз  $B$  и  $C$  изменяются в пределах  $0,333 \rightarrow \infty$  (предел 0,333 отвечает случаю радиальной линии). По мере отдаления места к. з. для участка  $LN$  — при уменьшении  $r$  и увеличении  $t$  — эти отношения увеличиваются; это в частности, объясняется тем, что при этом полные токи на рассматриваемом участке уменьшаются.

2. При уменьшении э. д. с. генератора, прилегающего к рассматриваемому участку, в сравнении с э. д. с. другого генератора, отношения токов нулевой последовательности к полным токам фаз  $B$  и  $C$  увеличиваются, и наоборот.

Отношение токов на участке  $LN$  схемы рис. 1 при двойном замыкании на землю

| $r$ | $t$ | $E_I = E_{II}$           |                          |                           | $E_I = 0,75; E_{II} = 1,0$    |                                |                               | $E_I = 1,0; E_{II} = 0,75$    |                                |                                |
|-----|-----|--------------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
|     |     | $\frac{I_{MO}}{I_{BLN}}$ | $\frac{I_{MO}}{I_{CLN}}$ | $\frac{I_{BLN}}{I_{CLN}}$ | $\frac{I_{MO}}{I_{BLN}}$      | $\frac{I_{MO}}{I_{CLN}}$       | $\frac{I_{BLN}}{I_{CLN}}$     | $\frac{I_{MO}}{I_{BLN}}$      | $\frac{I_{MO}}{I_{CLN}}$       | $\frac{I_{BLN}}{I_{CLN}}$      |
| 0   | 0   | 1,0                      | -0,5                     | -0,50                     | $0,64 + j 0,124$<br>(0,651)   | $-0,394 + j 0,0457$<br>(0,399) | $-0,586 + j 0,188$<br>(0,613) | $1,5 - j 0,875$<br>(1,735)    | $-0,642 - j 0,24$<br>(0,651)   | $-0,283 - j 0,248$<br>(0,375)  |
|     | 0,2 | 1,25                     | -0,625                   | -0,50                     | $0,758 + j 0,159$<br>(0,775)  | $-0,477 + j 0,0613$<br>(0,482) | $-0,588 + j 0,204$<br>(0,62)  | $1,865 - j 1,28$<br>(2,26)    | $-0,817 - j 0,177$<br>(0,835)  | $-0,254 - j 0,269$<br>(0,369)  |
|     | 0,4 | 1,666                    | -0,833                   | -0,50                     | $0,96 + j 0,218$<br>(0,985)   | $-0,616 + j 0,089$<br>(0,623)  | $-0,591 + j 0,228$<br>(0,632) | $2,42 - 1,955$<br>(3,11)      | $-1,11 - j 0,264$<br>(1,14)    | $0,225 - j 0,29$<br>(0,366)    |
|     | 0,6 | 2,5                      | -1,25                    | -0,50                     | $1,36 + j 0,333$<br>(1,398)   | $-0,888 + j 0,188$<br>(0,9)    | $-0,592 + j 0,247$<br>(0,643) | $3,48 - j 3,31$<br>(4,8)      | $-1,7 - j 0,442$<br>(1,75)     | $-0,1935 - j 0,309$<br>(0,364) |
|     | 0,8 | 5,0                      | -2,5                     | -0,50                     | $2,57 + j 0,667$<br>(2,65)    | $-1,72 + j 0,289$<br>(1,743)   | $-0,598 + j 0,268$<br>(0,656) | $5,66 - j 7,15$<br>(9,78)     | $-3,43 - j 0,955$<br>(3,56)    | $-0,168 - j 0,323$<br>(0,363)  |
| 0,2 | 0   | 0,713                    | -0,455                   | -0,636                    | $0,535 + j 0,073$<br>(0,54)   | $-0,376 + j 0,0357$<br>(0,378) | $-0,685 + j 0,159$<br>(0,701) | $0,98 - j 0,29$<br>(1,02)     | $-0,562 - j 0,0863$<br>(0,568) | $-0,506 - j 0,232$<br>(0,557)  |
|     | 0,2 | 0,883                    | -0,555                   | -0,666                    | $0,61 + j 0,089$<br>(0,616)   | $-0,449 + j 0,0476$<br>(0,452) | $-0,71 + j 0,184$<br>(0,733)  | $1,17 - j 0,363$<br>(1,225)   | $-0,701 - j 0,123$<br>(0,712)  | $-0,517 - j 0,266$<br>(0,58)   |
|     | 0,4 | 1,0                      | -0,714                   | -0,714                    | $0,725 + j 0,107$<br>(0,734)  | $-0,563 + j 0,0645$<br>(0,567) | $-0,744 + j 0,2$<br>(0,771)   | $1,38 - j 0,392$<br>(1,485)   | $-0,906 - j 0,61$<br>(0,92)    | $-0,576 - j 0,28$<br>(0,64)    |
|     | 0,6 | 1,25                     | -1,0                     | -0,80                     | $0,921 + j 0,131$<br>(0,93)   | $-0,78 + 0,0937$<br>(0,787)    | $-0,82 + j 0,219$<br>(0,846)  | $1,675 - j 0,403$<br>(1,725)  | $-1,266 - j 0,225$<br>(1,287)  | $-0,682 - j 0,298$<br>(0,745)  |
| 0,4 | 0   | 0,555                    | -0,417                   | -0,75                     | $0,461 + j 0,043$<br>(0,462)  | $-0,361 + j 0,0265$<br>(0,361) | $-0,77 + j 0,131$<br>(0,78)   | $0,69 - j 0,112$<br>(0,7)     | $-0,495 - j 0,056$<br>(0,498)  | $-0,685 - j 0,192$<br>(0,71)   |
|     | 0,2 | 0,624                    | -0,50                    | -0,80                     | $0,513 + j 0,05$<br>(0,514)   | $-0,426 + j 0,0346$<br>(0,427) | $-0,825 + j 0,149$<br>(0,832) | $0,78 - j 0,125$<br>(0,793)   | $-0,597 + j 0,0728$<br>(0,6)   | $-0,728 - j 0,209$<br>(0,755)  |
|     | 0,4 | 0,713                    | -0,625                   | -0,875                    | $0,587 + j 0,057$<br>(0,59)   | $-0,526 + j 0,0456$<br>(0,528) | $-0,88 + j 0,167$<br>(0,895)  | $0,87 - j 0,128$<br>(0,88)    | $-0,745 - j 0,092$<br>(0,75)   | $-0,818 - j 0,225$<br>(0,851)  |
| 0,6 | 0   | 0,455                    | -0,384                   | -0,845                    | $0,408 + j 0,024$<br>(0,409)  | $-0,349 + j 0,0174$<br>(0,35)  | $-0,85 + j 0,0887$<br>(0,855) | $0,52 - j 0,0465$<br>(0,521)  | $-0,431 - j 0,0318$<br>(0,431) | $-0,816 - j 0,132$<br>(0,826)  |
|     | 0,2 | 0,50                     | -0,455                   | -0,91                     | $0,443 + j 0,027$<br>(0,444)  | $-0,407 + j 0,0227$<br>(0,408) | $-0,915 + j 0,106$<br>(0,921) | $0,57 - j 0,05$<br>(0,571)    | $-0,512 - j 0,0404$<br>(0,513) | $-0,886 - j 0,147$<br>(0,9)    |
|     | 0,3 | 0,525                    | -0,50                    | -0,95                     | $0,47 + j 0,0275$<br>(0,471)  | $-0,448 + j 0,025$<br>(0,449)  | $-0,95 + j 0,108$<br>(0,955)  | $0,595 - j 0,0482$<br>(0,596) | $-0,562 - j 0,043$<br>(0,563)  | $-0,93 - j 0,1485$<br>(0,942)  |
| 0,8 | 0   | 0,384                    | -0,355                   | -0,921                    | $0,366 + j 0,0102$<br>(0,366) | $-0,34 + j 0,0088$<br>(0,34)   | $-0,92 + j 0,049$<br>(0,92)   | $0,41 - j 0,016$<br>(0,41)    | $-0,378 - j 0,0136$<br>(0,378) | $-0,92 - j 0,0689$<br>(0,92)   |
|     | 0,1 | 0,40                     | -0,384                   | -0,961                    | $0,379 + j 0,0109$<br>(0,379) | $-0,366 + j 0,0101$<br>(0,366) | $-0,96 + j 0,0545$<br>(0,964) | $0,426 - j 0,167$<br>(0,426)  | $-0,41 - j 0,0155$<br>(0,41)   | $-0,962 - j 0,0745$<br>(0,962) |

Таблица 2

Импедансы на клеммах реле при двойных замыканиях на землю в схеме рис. 1 (включение по Сименсу — схема А)

| r   | t   | $E_I = E_{II}$    |                   |                                 |                                 |                             |                             | $E_I = 0,75; E_{II} = 1,0$ |                   |                                 |                                 | $E_I = 1,0; E_{II} = 0,75$ |                   |                                 |                                 |
|-----|-----|-------------------|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|
|     |     | $Z_{BNP}/Z_{MNI}$ | $Z_{CNP}/Z_{MNI}$ | $Z_{BSp}/Z_{MNI} + 0,5 Z_{LNI}$ | $Z_{CSp}/Z_{MNI} + 0,5 Z_{LNI}$ | $Z_{BSp} - Z_{BNP}/Z_{SNI}$ | $Z_{CSp} - Z_{CNP}/Z_{SNI}$ | $Z_{BNP}/Z_{MNI}$          | $Z_{CNP}/Z_{MNI}$ | $Z_{BSp}/Z_{MNI} + 0,5 Z_{LNI}$ | $Z_{CSp}/Z_{MNI} + 0,5 Z_{LNI}$ | $Z_{BNP}/Z_{MNI}$          | $Z_{CNP}/Z_{MNI}$ | $Z_{BSp}/Z_{MNI} + 0,5 Z_{LNI}$ | $Z_{CSp}/Z_{MNI} + 0,5 Z_{LNI}$ |
| 0   | 0   | 1,75              | 0,875             | 1,75                            | 0,875                           | 1,5                         | 0,75                        | 1,31                       | 0,8               | 1,31                            | 0,8                             | 2,62                       | 0,984             | 2,62                            | 0,984                           |
|     | 0,2 | 2,064             | 1,032             | 2,0                             | 1,0                             | 1,5                         | 0,75                        | 1,46                       | 0,905             | 1,44                            | 0,893                           | 3,24                       | 1,205             | 3,075                           | 1,14                            |
|     | 0,4 | 2,58              | 1,29              | 2,31                            | 1,155                           | 1,5                         | 0,75                        | 1,72                       | 1,09              | 1,61                            | 1,02                            | 4,18                       | 1,575             | 3,55                            | 1,34                            |
|     | 0,6 | 3,62              | 1,81              | 2,71                            | 1,356                           | 1,5                         | 0,75                        | 2,23                       | 1,43              | 1,815                           | 1,165                           | 6,4                        | 2,88              | 4,38                            | 1,6                             |
|     | 0,8 | 6,75              | 3,37              | 3,246                           | 1,623                           | 1,5                         | 0,75                        | 3,81                       | 2,49              | 2,085                           | 1,37                            | 12,55                      | 4,57              | 5,28                            | 1,935                           |
| 0,2 | 0   | 1,39              | 0,886             | 1,39                            | 0,886                           | 1,285                       | 0,818                       | 1,174                      | 0,83              | 1,174                           | 0,83                            | 1,765                      | 0,98              | 1,765                           | 0,98                            |
|     | 0,2 | 1,542             | 1,027             | 1,5                             | 1,0                             | 1,25                        | 0,833                       | 1,265                      | 0,927             | 1,254                           | 0,915                           | 2,01                       | 1,165             | 1,91                            | 1,11                            |
|     | 0,4 | 1,75              | 1,25              | 1,566                           | 1,12                            | 1,2                         | 0,857                       | 1,41                       | 1,1               | 1,32                            | 1,02                            | 2,28                       | 1,46              | 1,935                           | 1,24                            |
|     | 0,6 | 2,064             | 1,65              | 1,5                             | 1,2                             | 1,125                       | 0,9                         | 1,655                      | 1,4               | 1,31                            | 1,11                            | 2,7                        | 1,965             | 1,75                            | 1,3                             |
| 0,4 | 0   | 1,195             | 0,897             | 1,195                           | 0,897                           | 1,167                       | 0,875                       | 1,076                      | 0,842             | 1,076                           | 0,842                           | 1,37                       | 0,977             | 1,37                            | 0,977                           |
|     | 0,2 | 1,28              | 1,025             | 1,25                            | 1,0                             | 1,125                       | 0,9                         | 1,143                      | 0,955             | 1,13                            | 0,947                           | 1,48                       | 1,13              | 1,42                            | 1,075                           |
|     | 0,4 | 1,392             | 1,219             | 1,23                            | 1,08                            | 1,07                        | 0,937                       | 1,234                      | 1,11              | 1,14                            | 1,025                           | 1,6                        | 1,36              | 1,33                            | 1,14                            |
| 0,6 | 0   | 1,07              | 1,908             | 1,07                            | 0,908                           | 1,092                       | 0,923                       | 1,01                       | 0,865             | 1,01                            | 0,865                           | 1,15                       | 0,955             | 1,15                            | 0,955                           |
|     | 0,2 | 1,125             | 1,023             | 1,1                             | 1,0                             | 1,05                        | 0,955                       | 1,055                      | 0,967             | 1,05                            | 0,965                           | 1,21                       | 1,09              | 1,16                            | 1,04                            |
|     | 0,3 | 1,157             | 1,1               | 1,079                           | 1,025                           | 1,026                       | 0,975                       | 1,087                      | 1,037             | 1,047                           | 1,0                             | 1,245                      | 1,175             | 1,15                            | 1,05                            |
| 0,8 | 0   | 0,98              | 0,91              | 0,98                            | 0,91                            | 1,037                       | 0,965                       | 0,958                      | 0,881             | 0,958                           | 0,881                           | 1,013                      | 0,93              | 1,013                           | 0,93                            |
|     | 0,1 | 1,0               | 0,96              | 1,004                           | 0,965                           | 1,02                        | 0,98                        | 0,974                      | 0,942             | 0,984                           | 0,951                           | 1,033                      | 0,993             | 1,025                           | 0,99                            |

3. Отношения токов нулевой последовательности к полным токам фаз  $B$  и  $C$  на участке  $LN$  больше для фазы  $B$ , а на участке  $KM$  больше для фазы  $C$ .

4. Отношения полных токов  $\frac{i_{BLN}}{i_{CLN}}$  и  $\frac{i_{CKM}}{i_{BKM}}$  при  $E_I = E_{II}$  изменяются в пределах  $0,5 \div 1,0$ ; при  $E_I \neq E_{II}$  эти отношения могут принять значения меньше 0,5.

5. Отношения полных токов  $\frac{i_{BLN}}{i_{CLN}}$  и  $\frac{i_{CKM}}{i_{BKM}}$  убывают с уменьшением импеданса участка схемы рис. 1, прилегающего к генератору с противоположной стороны; эти отношения принимают наименьшие значения при бесконечно малой величине импеданса участка, прилегающего к генератору с противоположной стороны; или, что то же, при бесконечно большой мощности генераторов с противоположной стороны (при  $E_I = E_{II}$  значение 0,5).

6. При уменьшении э. д. с. генератора у рас-

матриваемого участка в сравнении с э. д. с. другого генератора отношения полных токов  $\frac{i_{BLN}}{i_{CLN}}$  и  $\frac{i_{CKM}}{i_{BKM}}$  уменьшаются, и наоборот.

Из выражений (21) — (23) следует, что при неравенстве импедансов прямой и обратной последовательностей полученные выше соотношения табл. 1 могут несколько измениться.

#### Анализ величин импедансов на клеммах реле на участках с $I_0=0$ схемы рис. 1.

На основании выражений для импедансов и отношений токов, приведенных выше, и табл. 1, вычислены величины импедансов на клеммах реле для разных случаев двойных замыканий на землю в схеме рис. 1. Расчеты производились для защит, включенных по схемам  $A$ ,  $B$  и  $V$  и установленных в точках  $Q$ ,  $M$ ,  $N$  и  $S$  рис. 1, причем принималось:

$$Z_{SNI} = 0,5 Z_{LNI}; Z_{QMI} = 0,5 Z_{KMI}.$$

Таблица 3

Импедансы на клеммах реле при двойных замыканиях на землю в схеме рис. 1 (включение на линейное напряжение и токи — схема Б)

| $r$ | $t$ | Участок $LN$   |           |                |           | Участок $KM$   |           |                         |                         |           |           |           |           |           |           |                         |                         |
|-----|-----|----------------|-----------|----------------|-----------|----------------|-----------|-------------------------|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------------------|-------------------------|
|     |     | $E_I = E_{II}$ |           | $E_I = E_{II}$ |           | $E_I = E_{II}$ |           | $E_I = E_{II}$          |                         |           |           |           |           |           |           |                         |                         |
|     |     | $Z_{BNP}$      | $Z_{MNI}$ | $Z_{CNP}$      | $Z_{MNI}$ | $Z_{BSP}$      | $Z_{CSp}$ | $Z_{BNP} + 0,5 Z_{LNI}$ | $Z_{CSp} + 0,5 Z_{LNI}$ | $Z_{BNP}$ | $Z_{MNI}$ | $Z_{CNP}$ | $Z_{MNI}$ | $Z_{BQP}$ | $Z_{CSQ}$ | $Z_{MNI} + 0,5 Z_{KMI}$ | $Z_{CSQ} + 0,5 Z_{KMI}$ |
| 0   | 0   | 3,5            | 1,75      | 3,5            | 1,75      | 1,75           | 3,5       | 1,75                    | 3,5                     |           |           |           |           |           |           |                         |                         |
|     | 0,2 | 4,13           | 2,27      | 4,0            | 2,08      | 1,77           | 2,79      | 1,77                    | 2,79                    |           |           |           |           |           |           |                         |                         |
|     | 0,4 | 5,16           | 3,21      | 4,62           | 2,51      | 1,79           | 2,39      | 1,79                    | 2,39                    |           |           |           |           |           |           |                         |                         |
|     | 0,6 | 7,24           | 5,15      | 5,42           | 3,09      | 1,816          | 2,14      | 1,816                   | 2,14                    |           |           |           |           |           |           |                         |                         |
|     | 0,8 | 13,5           | 11,06     | 6,5            | 3,86      | 1,82           | 1,96      | 1,82                    | 1,96                    |           |           |           |           |           |           |                         |                         |
| 0,2 | 0   | 2,78           | 1,77      | 2,78           | 1,77      | 2,064          | 4,875     | 2,0                     | 4,34                    |           |           |           |           |           |           |                         |                         |
|     | 0,2 | 3,08           | 2,42      | 3,0            | 2,14      | 2,054          | 3,83      | 2,0                     | 3,31                    |           |           |           |           |           |           |                         |                         |
|     | 0,4 | 3,5            | 3,74      | 3,132          | 2,61      | 2,05           | 3,5       | 2,0                     | 2,87                    |           |           |           |           |           |           |                         |                         |
|     | 0,6 | 4,13           | 7,55      | 3,0            | 3,19      | 2,046          | 3,98      | 2,0                     | 2,76                    |           |           |           |           |           |           |                         |                         |
|     | 0,8 | 2,39           | 1,79      | 2,39           | 1,79      | 2,58           | 7,15      | 2,31                    | 5,375                   |           |           |           |           |           |           |                         |                         |
| 0,4 | 0,2 | 2,56           | 2,7       | 2,5            | 2,24      | 2,5            | 5,6       | 2,24                    | 3,84                    |           |           |           |           |           |           |                         |                         |
|     | 0,4 | 2,78           | 5,42      | 2,46           | 2,85      | 2,44           | 6,375     | 2,16                    | 3,34                    |           |           |           |           |           |           |                         |                         |
|     | 0,6 | 2,14           | 1,816     | 2,14           | 1,816     | 3,62           | 11,65     | 2,71                    | 6,7                     |           |           |           |           |           |           |                         |                         |
| 0,6 | 0,2 | 2,25           | 3,55      | 2,2            | 2,47      | 3,3            | 9,95      | 2,4                     | 4,15                    |           |           |           |           |           |           |                         |                         |
|     | 0,8 | 0              | 1,96      | 1,82           | 1,96      | 1,82           | 6,74      | 25,5                    | 3,246                   | 8,5       |           |           |           |           |           |                         |                         |

Для схемы А включения защиты результаты вычислений даны в табл. 2 для разных значений  $E_I$  и  $E_{II}$ , а для схем Б и В — в табл. 3 и 4 для  $E_I = E_{II}$ .

В табл. 2 приведены только значения импедансов при разных величинах  $r$  и  $t$  для участка  $LN$ ; значения импедансов для участка  $KM$  могут быть получены из той же таблицы при взаимной замене величин  $r$  и  $t$ ,  $E_I$  и  $E_{II}$  и фаз  $B$  и  $C$ . При вычислении импедансов табл. 2, 3 и 4 активные сопротивления, включая  $R_m$  и  $R_n$  (рис. 1), не учитывались.

В нулевой последовательности принималось  $Z_{MNO} = 3,5 Z_{MNI}$ .

Из анализа выражений для импедансов и данных табл. 2—4 следует:

1. При включении защиты по схемам А и Б и при  $E_I = E_{II}$  (рис. 1) импеданс на клеммах реле одной из поврежденных фаз участка с  $I_0 = 0$  меньше, чем на другой поврежденной фазе, и в некоторых случаях он может быть меньше, чем при двухфазном к. з. В пределе — при бесконечной

Таблица 4

Импедансы на клеммах реле при двойных замыканиях на землю в схеме рис. 1 (включение на линейные напряжения и разность линейных токов — схема В)

| $r$ | $t$ | Участок $LN$   |           |                |           | Участок $KM$   |           |                         |                         |           |           |           |           |           |           |                         |                         |
|-----|-----|----------------|-----------|----------------|-----------|----------------|-----------|-------------------------|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------------------|-------------------------|
|     |     | $E_I = E_{II}$ |           | $E_I = E_{II}$ |           | $E_I = E_{II}$ |           | $E_I = E_{II}$          |                         |           |           |           |           |           |           |                         |                         |
|     |     | $Z_{BNP}$      | $Z_{MNI}$ | $Z_{CNP}$      | $Z_{MNI}$ | $Z_{BSP}$      | $Z_{CSp}$ | $Z_{MNI} + 0,5 Z_{LNI}$ | $Z_{CSp} + 0,5 Z_{LNI}$ | $Z_{BNP}$ | $Z_{MNI}$ | $Z_{CNP}$ | $Z_{MNI}$ | $Z_{BQP}$ | $Z_{CSQ}$ | $Z_{MNI} + 0,5 Z_{KMI}$ | $Z_{CSQ} + 0,5 Z_{KMI}$ |
| 0   | 0   | 1,165          | 1,165     | 1,165          | 1,165     | 1,165          | 1,165     | 1,165                   | 1,165                   | 1,165     | 1,165     | 1,165     | 1,165     | 1,165     | 1,165     | 1,165                   | 1,165                   |
|     | 0,2 | 1,37           | 1,505     | 1,33           | 1,39      | 1,08           | 6,76      | 1,08                    | 1,08                    | 1,08      | 1,08      | 1,08      | 1,08      | 1,08      | 1,08      | 1,08                    | 1,08                    |
|     | 0,4 | 1,72           | 2,14      | 1,54           | 1,685     | 1,02           | 3,58      | 1,02                    | 3,58                    | 1,02      | 3,58      | 1,02      | 3,58      | 1,02      | 3,58      | 1,02                    | 3,58                    |
|     | 0,6 | 2,4            | 3,42      | 1,81           | 2,055     | 0,976          | 2,61      | 0,976                   | 2,61                    | 0,976     | 2,61      | 0,976     | 2,61      | 0,976     | 2,61      | 0,976                   | 2,61                    |
|     | 0,8 | 4,5            | 7,36      | 2,154          | 2,56      | 0,942          | 2,12      | 0,942                   | 2,12                    | 0,942     | 2,12      | 0,942     | 2,12      | 0,942     | 2,12      | 0,942                   | 2,12                    |
| 0,2 | 0   | 1,08           | 1,295     | 1,08           | 1,3       | 1,37           | $\infty$  | 1,33                    | 1,33                    | $\infty$  | 1,33      | 1,33      | 1,33      | $\infty$  | 1,33      | 1,33                    | 1,33                    |
|     | 0,2 | 1,227          | 1,805     | 1,197          | 1,61      | 1,227          | 7,65      | 1,197                   | 7,65                    | 1,197     | 7,65      | 1,197     | 7,65      | 1,197     | 7,65      | 1,197                   | 7,65                    |
|     | 0,4 | 1,45           | 2,92      | 1,302          | 2,04      | 1,134          | 4,675     | 1,11                    | 4,675                   | 1,11      | 4,675     | 1,11      | 4,675     | 1,11      | 4,675     | 1,11                    | 4,675                   |
|     | 0,6 | 1,83           | 6,325     | 1,33           | 2,65      | 1,07           | 4,43      | 1,07                    | 4,43                    | 1,07      | 4,43      | 1,07      | 4,43      | 1,07      | 4,43      | 1,07                    | 4,43                    |
|     | 0,8 | 0              | 0,942     | 1,7            | 0,942     | 1,7            | 0,942     | 1,7                     | 0,942                   | 1,7       | 0,942     | 1,7       | 0,942     | 1,7       | 0,942     | 1,7                     | 0,942                   |
| 0,4 | 0   | 1,02           | 1,43      | 1,02           | 1,435     | 1,72           | $\infty$  | 1,54                    | 1,54                    | $\infty$  | 1,54      | 1,54      | 1,54      | $\infty$  | 1,54      | 1,54                    | 1,54                    |
|     | 0,2 | 1,134          | 2,25      | 1,11           | 1,87      | 1,45           | 9,38      | 1,11                    | 9,38                    | 1,11      | 9,38      | 1,11      | 9,38      | 1,11      | 9,38      | 1,11                    | 9,38                    |
|     | 0,4 | 1,3            | 4,825     | 1,15           | 2,53      | 1,3            | 7,45      | 1,15                    | 7,45                    | 1,15      | 7,45      | 1,15      | 7,45      | 1,15      | 7,45      | 1,15                    | 7,45                    |
| 0,6 | 0   | 0,976          | 1,57      | 0,976          | 1,57      | 2,4            | $\infty$  | 1,81                    | 1,81                    | $\infty$  | 1,81      | 1,81      | 1,81      | $\infty$  | 1,81      | 1,81                    | 1,81                    |
|     | 0,2 | 1,07           | 3,24      | 1,047          | 2,28      | 1,83           | 13,3      | 1,33                    | 13,3                    | 1,33      | 13,3      | 1,33      | 13,3      | 1,33      | 13,3      | 1,33                    | 13,3                    |
| 0,8 | 0   | 0,942          | 1,7       | 0,942          | 1,7       | 0,942          | 1,7       | 0,942                   | 1,7                     | 0,942     | 1,7       | 0,942     | 1,7       | 0,942     | 1,7       | 0,942                   | 1,7                     |

мощности генераторов I и II рис. 1 ( $r=t=0$ ) преуменьшение равно 12,5% (табл. 2 и 3).

При включении защиты по схеме В импеданс на клеммах реле в подавляющем числе случаев больше импеданса прямой последовательности (табл. 4) и лишь в одном предельном случае имеет место преуменьшение на 8%. Такое же максимальное преуменьшение возможно в случае одностороннего питания для всех схем включения реле А—В.

Возможность неселективных отключений в рассматриваемых случаях в связи с преуменьшением замера реле характеризуется рис. 2, а и б.

2. В схеме А при  $E_I = E_{II}$  разница в величинах импедансов реле, установленных непосредственно у места замыкания на землю (точки M и N) и на отдалении от места замыканий на землю (точки S и Q) в пределе достигает величины 0,75 от импеданса при двухфазном к. з. (табл. 2). Такое максимальное преуменьшение имеет место при мощности генераторов рис. 1 с противоположной стороны  $P = \infty$  (например, для защиты в S при  $P_I = \infty$

и  $r=0$ ). В схеме *B* следует также учитывать приращение импеданса, при котором возможно неселективное действие, равное 0,75 от импеданса при двухфазном к. з. Хотя приращение импеданса может быть значительно меньшим [например, для защиты в точке Q фазы C при  $t=0$  приращение равно нулю, см. выражение (11)], однако это не является определяющим, так как при этом импеданс на клеммах реле по абсолютной величине велик (табл. 3), а повреждение будет отключено раньше от других защит.

В схеме *B* указанная разница в импедансах всегда равна импедансу прямой последовательности.

Возможность неселективных отключений в связи с преуменьшением приращением импеданса характеризуется рис. 2, *a*.

3. При  $E_I \neq E_H$  искажение в замерах импедансов может быть еще больше, чем указано выше (табл. 2). Это вызвано соответствующим изменением отношений токов при  $E_I \neq E_H$  в сравнении с случаем  $E_I = E_H$  (табл. 1).

Из изложенного следует, что ни одна из схем присоединения реле на междуфазовые напряжения не обеспечивает на участках С  $I_0 = 0$  замер импедансов прямой последовательности и что при некоторых условиях импедансы на клеммах реле принимают значения, которые значительно меньше импедансов прямой последовательности; это может вызвать неселективные выключения, например, в случаях, показанных на рис. 2. Наилучшие результаты дает схема с присоединением на разность линейных токов и междуфазовые напряжения (схема *B*). Однако сложность схемы защиты (отдельные комплекты защиты при  $I_0 = 0$  и  $I_0 \neq 0$ ) затрудняет ее практическое применение. Из двух других схем (*A* и *B*) следует отдать предпочтение схеме с присоединением на линейный ток и междуфазовые напряжения (схема *B*), в которой менее возможны замеры импедансов, меньших импедансов прямой последовательности. При на-

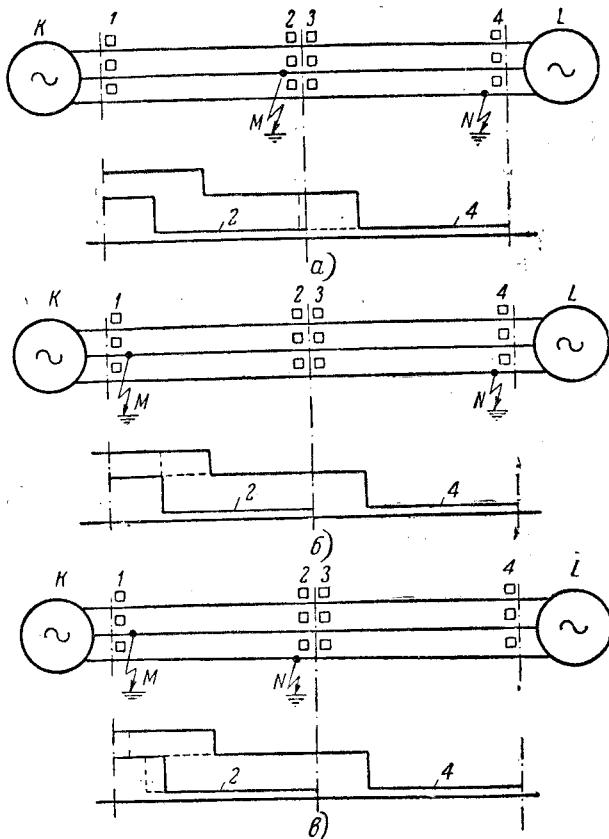


Рис. 2. Действие дистанционной защиты при двойных замыканиях на землю (пунктиром показаны случаи неселективного действия защиты при импедансах на клеммах реле, меньших импедансов прямой последовательности)

стройке защиты в этой схеме по трехфазному к. з. импедансы на клеммах реле на участках с  $I_0 = 0$  при двойном замыкании на землю увеличиваются примерно на 15%, что почти совершенно исключает возможность неселективных выключений (табл. 2).

## Влияние вольтовых дуг на замер реактансных реле

**Канд. техн. наук Г. И. АТАБЕКОВ и инж. О. М. БОГАТЫРЕВ**  
«Теплоэлектропроект»

При анализе искажения замеров реактансных реле под влиянием переходных сопротивлений в месте повреждения необходимо учитывать возможные в условиях эксплуатации виды и характер повреждений, зависящие в значительной мере от конструкции и взаимного расположения токоведущих частей, от конструкции опор и ряда других факторов.

К сожалению, у нас отсутствуют систематизированные материалы и данные аварийной статистики, классифицированные по видам несимметричных к. з., сопровождающихся неравенством переходных сопротивлений. Тем не менее, исходя из общих соображений о возможности возникновения к. з. в системах 110 кВ, работающих с наглухо заземленной нулевой точкой, можно высказать следующие положения.

1. Наиболее вероятным видом трехфазных к. з. через переходные сопротивления в пролетах линий электропередач 110 кВ являются дуговые перекрытия двух крайних фаз на среднюю (рис. 1, *a*).

2. Дуговые трехфазные к. з. на металлических опорах линий передач 110 кВ также могут либо относиться к типу к. з., изображенному на рис. 1, *a*, либо в случае перекрытия всех трех фаз на траверзу (по гирляндам) для них будет характерна схема *b*, рис. 1. То же относится и к шинам 110 кВ.

3. Двухфазные замыкания на землю на линиях передач мыслится, главным образом, в результате перекрытия одной из фаз на заземляющий спуск троса с одновременным перекрытием той же фазы на соседнюю фазу (например, рис. 3, *c*).

Переходным сопротивлением в месте повреждения является сопротивление вольтовых дуг. При замыканиях на землю к сопротивлениям дуг добавляются еще сопротивления заземляющих устройств и самих опор. Как показывают опытные данные, мгновенное сопротивление дуги, получаемое как отношение мгновенных значений напряжения и тока в дуге, есть величина, сильно изменяющаяся в течение периода.

Для релейной защиты практически имеет значение не мгновенное, а эффективное сопротивление дуги, т. е. то, которое показывал бы электродинамический прибор.

Экспериментальное изучение дуг целым рядом исследователей показывает, что величину, весьма близкую к эффективному сопротивлению дуги, дает отношение пика напряжения к пике тока в дуге. Эффективное сопротивление дуги можно считать почти полностью активным, так как согласно опытным данным  $\cos \phi$  для вольтовой дуги при больших значениях тока мало отличается от единицы.

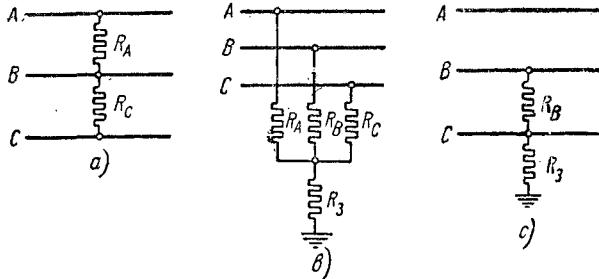


Рис. 1. Замыкания через неодинаковые переходные сопротивления

В начальной стадии к. з. длину дуги можно с достаточной точностью принять равной расстоянию между электродами, между которыми она возникла.

По длине дуги и величине тока в дуге, на основании различных экспериментальных формул может быть найдено ориентировочное значение сопротивления дуги. В частности согласно Варрингтону,  $R = \frac{28700 \cdot L}{I^{1.4}}$  [О], где  $L$  — длина дуги (м) и  $I$  — ток (А).

После своего возникновения длина дуги резко увеличивается; одновременно растет и сопротивление дуги. С увеличением сопротивления ток в дуге уменьшается, что в свою очередь приводит к дополнительному возрастанию сопротивления.

**Методика получения выражений для токов и напряжений.** На рис. 1, б представлена расчетная схема для общего случая замыканий через неодинаковые переходные сопротивления. Все остальные виды повреждений можно рассматривать как частные случаи этой расчетной схемы.

Разлагая несимметричные системы токов и напряжений на симметричные составляющие, можно для каждой системы в отдельности написать уравнение Кирхгофа. Таким образом получаются три основных уравнения, определяемые параметрами системы:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_A - \dot{U}_{1A} &= i_{1A} Z_1, \\ -\dot{U}_{2A} &= i_{2A} Z_2, \\ -\dot{U}_0 &= i_0 Z_0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $Z_1, Z_2, Z_0$  — результирующие векторы импедансов системы прямой, обратной и нулевой последовательностей,  $\dot{E}_A$  — результирующая э. д. с. системы в фазе  $A$ ,  $\dot{U}$  и  $i$  — напряжения и ток в месте повреждения.

Место повреждения дает три дополнительных условия:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A &= i_A R_A + 3 \cdot i_0 R_s, \\ \dot{U}_B &= i_B R_B + 3 \cdot i_0 R_s, \\ \dot{U}_C &= i_C R_C + 3 \cdot i_0 R_s. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Разлагая полные токи и напряжения на симметричные составляющие, можно систему уравнений (2) представить в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_0 + \dot{U}_{1A} + \dot{U}_{2A} &= (i_0 + i_{1A} + i_{2A}) R_A + 3 \cdot i_0 R_s, \\ \dot{U}_0 + a^2 \dot{U}_{1A} + a \dot{U}_{2A} &= (i_0 + a^2 i_{1A} + a i_{2A}) R_B + 3 \cdot i_0 R_s, \\ \dot{U}_0 + a \dot{U}_{1A} + a^2 \dot{U}_{2A} &= (i_0 + a i_{1A} + a^2 i_{2A}) R_C + 3 \cdot i_0 R_s. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Совместное решение системы шести уравнений (1) и (3) дает возможность найти все шесть неизвестных ( $i_0, i_{1A}, i_{2A}, U_0, \dot{U}_{1A}$  и  $\dot{U}_{2A}$ ).

Исключая из системы уравнений напряжения  $\dot{U}_{1A}, \dot{U}_{2A}$  и  $\dot{U}_0$ , можно получить для токов  $i_{1A}, i_{2A}$  и  $i_0$  следующие три уравнения:

$$\left. \begin{aligned} i_0 Z_{0A} + i_{1A} Z_{1A} + i_{2A} Z_{2A} &= \dot{E}_A, \\ i_0 Z_{0B} + i_{1A} a^2 Z_{1B} + i_{2A} a Z_{2B} &= a^2 \dot{E}_A, \\ i_0 Z_{0C} + i_{1A} a Z_{1C} + i_{2A} a^2 Z_{2C} &= a \dot{E}_A, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

в которых ради упрощения записи положено:

$$\left. \begin{aligned} Z_0 + R_A + 3R_s &= Z_{0A}, Z_1 + R_A = Z_{1A}, Z_2 + R_A = Z_{2A}, \\ Z_0 + R_B + 3R_s &= Z_{0B}, Z_1 + R_B = Z_{1B}, Z_2 + R_B = Z_{2B}, \\ Z_0 + R_C + 3R_s &= Z_{0C}, Z_1 + R_C = Z_{1C}, Z_2 + R_C = Z_{2C}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Полученные в результате решения системы уравнений (4) выражения для токов, а также найденные затем выражения для напряжений даны в табл. 1. В табл. 2 и 3 даны анало-

Таблица 1

(Общий случай — рис. 1 б)

|                |   |
|----------------|---|
| $\dot{i}_0$    | $\frac{\dot{E}_A}{\dot{A}} \left[ R_B R_C + a R_A \cdot R_B + a^2 R_C R_A - Z_2 (R_A + a^2 R_B + a R_C) \right]$  |
| $\dot{i}_{1A}$ | $\frac{\dot{E}_A}{\dot{A}} \left[ 3Z_2 (Z_0 + 3R_s) + (Z_2 + Z_0 + 3R_s) \Sigma R + \Sigma R R \right]$   |
| $\dot{i}_{2A}$ | $\frac{\dot{E}_A}{\dot{A}} \left[ R_B R_C + a R_C R_A + a^2 R_A R_B - (Z_0 + 3R_s) (R_A + a R_B + a^2 R_C) \right]$   |
| $\dot{i}_A$    | $\frac{\dot{E}_A}{\dot{A}} \left\{ 3Z_2 (Z_0 + 3R_s) + 3R_B R_C + (1 - a^2) (Z_2 + Z_0 + 3R_s) (R_B + R_C) - j \sqrt{3} \left[ Z_2 R_C + (Z_0 + 3R_s) R_B \right] \right\}$   |
| $\dot{i}_B$    | $\frac{a^2 \dot{E}_A}{\dot{A}} \left\{ 3Z_2 (Z_0 + 3R_s) + 3R_C R_A + (1 - a^2) (Z_2 + Z_0 + 3R_s) (R_C + R_A) - j \sqrt{3} \left[ Z_2 R_A + (Z_0 + 3R_s) R_C \right] \right\}$   |
| $\dot{i}_C$    | $\frac{a \dot{E}_A}{\dot{A}} \left\{ 3Z_2 (Z_0 + 3R_s) + 3R_A R_B + (1 - a^2) (Z_2 + Z_0 + 3R_s) (R_A + R_B) - j \sqrt{3} \left[ Z_2 R_B + (Z_0 + 3R_s) R_A \right] \right\}$   |
| $\dot{U}_0$    | $- \frac{\dot{E}_A Z_0}{\dot{A}} \left[ R_B R_C + a R_A R_B + a^2 R_C R_A - Z_2 (R_A + a^2 R_B + a R_C) \right]$  |
| $\dot{U}_{1A}$ | $\frac{\dot{E}_A}{\dot{A}} \left[ 3R_A R_B R_C + (Z_2 + Z_0 + 3R_s) \Sigma R R + Z_2 (Z_0 + 3R_s) \Sigma R \right]$   |
| $\dot{U}_{2A}$ | $- \frac{\dot{E}_A \cdot Z_2}{\dot{A}} \left[ R_B R_C + a R_C R_A + a^2 R_A R_B - (Z_0 + 3R_s) \times (R_A + a R_B + a^2 R_C) \right]$  |
| $\dot{U}_A$    | $\frac{\dot{E}_A}{\dot{A}} \left\{ 3R_A (Z_2 Z_0 + R_B R_C) + (1 - a) (Z_2 + Z_0) R_A (R_B + R_C) + j \sqrt{3} R_A (Z_2 R_B + Z_0 R_C) + 3R_s \left[ \Sigma R R + Z_2 \times (2R_A - a^2 R_B - a R_C) \right] \right\}$ |

П р о д о л ж е н и е

|             |   |
|-------------|---|
| $\dot{U}_B$ | $\frac{a^2 \dot{E}_A}{\dot{A}} \left\{ 3R_B(Z_2 Z_0 + R_C R_A) + (1-a)(Z_2 + Z_0) R_B(R_C + R_A) + j\sqrt{3} R_B(\dot{Z}_2 R_C + \dot{Z}_0 R_A) + 3R_3 \left[ \Sigma R R + Z_2 \times (2R_B - a^2 R_C - aR_A) \right] \right\}$ |
| $\dot{U}_C$ | $\frac{a \dot{E}_A}{\dot{A}} \left\{ 3R_C(Z_2 Z_0 + R_A R_B) + (1-a)(Z_2 + Z_0) R_C(R_A + R_B) + j\sqrt{3} R_C(Z_2 R_A + Z_0 R_B) + 3R_3 \left[ \Sigma R R + Z_2 \times (2R_C - a^2 R_A - aR_B) \right] \right\}$               |
| $\dot{A}$   | $3Z_1 Z_2 (Z_0 + 3R_3) + 3R_A R_B R_C + (Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3R_3) \times \Sigma R R + \left[ (Z_1 + Z_2)(Z_0 + 3R_3) + Z_1 Z_2 \right] \Sigma R$   |

П р и м е ч а н и я:  $\Sigma R R = R_A \cdot R_B + R_B \cdot R_C + R_C \cdot R_A$   
 $\Sigma R = R_A + R_B + R_C$

тические выражения для частных случаев (схемы *a*, *c* рис. 1).  
**Векторные диаграммы токов и напряжений.** Для расчетных случаев *a* и *c* рис. 1 даны векторные диаграммы токов и напряжений, построенные на основании формул табл. 2 и 3. При построении принято для системы  $x_1 = x_2$  и  $x_0 = 2x_1$ . Активные сопротивления системы не учитывались. В случае *a* принято:  $R_B = 0$ ,  $R_3 = \infty$ ,  $R_A = 2x_1$  и  $R_C$  меняется от 0 до  $\infty$ . В случае *c*:  $R_C = 0$ ,  $R_A = \infty$ ,  $R_3 = 2x_1$  и  $R_B$  меняется от 0 до  $\infty$ . Значения величин  $\frac{R_C}{x_1}$  (в случае *a*) и  $\frac{R_B}{x_1}$  (в случае *c*) указаны в скобках при индексах для  $i$  и  $\dot{U}$ .

Можно доказать, что вектора токов и напряжений в рассмотренных случаях перемещаются по окружностям.

Т а б л и ц а 2

(Случай *a*:  $R_3 = \infty$ ;  $R_B = 0$  при  
 $Z_1 = jx_1$ ;  $Z_2 = jx_2$ )

|             |   |
|-------------|---|
| $i_A$       | $\frac{\dot{E}_A}{\dot{A}'} \left[ 1,5R_C + j \left( 3x_2 + \frac{\sqrt{3}}{2} R_C \right) \right]$   |
| $i_B$       | $\frac{\dot{E}_A}{\dot{A}'} \left[ \left( 1,5\sqrt{3}x_2 - 1,5R_C \right) + j \left( -1,5x_2 - \sqrt{3}R_A - \frac{\sqrt{3}}{2}R_C \right) \right]$                   |
| $i_C$       | $\frac{\dot{E}_A}{\dot{A}'} \left[ -1,5\sqrt{3}x_2 + j \left( -1,5x_2 + \sqrt{3}R_A \right) \right]$  |
| $\dot{U}_A$ | $\frac{\dot{E}_A}{\dot{A}'} \left[ \left( \frac{\sqrt{3}}{2}x_2 R_C + R_C R_A \right) + j \left( 2x_2 R_A + 0,5x_2 R_C \right) \right]$                               |
| $\dot{U}_B$ | $\frac{\dot{E}_A}{\dot{A}'} \left[ \left( \frac{\sqrt{3}}{2}x_2 R_C - 0,5R_C R_A \right) + j \left( 0,5x_2 R_C - x_2 R_A - \frac{\sqrt{3}}{2}R_C R_A \right) \right]$ |
| $\dot{U}_C$ | $\frac{\dot{E}_A}{\dot{A}'} \left[ \left( -\sqrt{3}x_2 R_C - 0,5R_C R_A \right) + j \left( -x_2 R_A - x_2 R_C + \frac{\sqrt{3}}{2}R_C R_A \right) \right]$            |
| $\dot{A}'$  | $(-3x_1 x_2 + R_C R_A) + j(x_1 + x_2)(R_A + R_C)$   |

Т а б л и ц а 3  
(Случай с рис. 1:  $R_A = \infty$ ;  $R_C = 0$ )

|             |  |
|-------------|--|
| $\dot{i}_0$ | $\frac{\dot{E}_A}{\dot{A}''} \left[ -0,5R_B + j \left( -x_2 + \frac{\sqrt{3}}{2} R_B \right) \right]$  |
| $i_A$       | 0  |
| $i_B$       | $\frac{\dot{E}_A}{\dot{A}''} \left[ \frac{\sqrt{3}}{2}x_2 + \sqrt{3}x_0 + j \left( -1,5x_2 - 3\sqrt{3}R_3 \right) \right]$   |
| $i_C$       | $\frac{\dot{E}_A}{\dot{A}''} \left[ \left( -\frac{\sqrt{3}}{2}x_2 - \sqrt{3}x_0 - 1,5R_B \right) + j \left( -1,5x_2 + 1,5\sqrt{3}R_B + 3\sqrt{3}R_3 \right) \right]$               |
| $\dot{U}_0$ | $\frac{\dot{E}_A x_0}{\dot{A}''} \left[ -x_2 + \frac{\sqrt{3}}{2}R_B + j0,5R_B \right]$  |
| $\dot{U}_A$ | $\frac{\dot{E}_A}{\dot{A}''} \left[ \left[ -3x_2 x_0 + \frac{\sqrt{3}}{2}R_B(x_0 - x_2) + 3R_3 - R_B \right] + j \left[ 1,5R_B(x_2 + x_0) + 6x_2 R_3 \right] \right]$              |
| $\dot{U}_B$ | $\frac{\dot{E}_A}{\dot{A}''} \left[ \left( \frac{\sqrt{3}}{2}x_2 R_B + \sqrt{3}x_0 R_B - 1,5R_3 R_B \right) + j \left( 1,5x_2 R_B - 3x_2 R_3 - 1,5\sqrt{3}R_3 R_B \right) \right]$ |
| $\dot{U}_C$ | $\frac{\dot{E}_A}{\dot{A}''} \left[ -1,5R_3 R_B + j \left( -3x_2 R_3 + 1,5\sqrt{3}R_3 R_B \right) \right]$   |
| $\dot{A}''$ | $(3R_B R_3 - \Sigma x x) + j \left[ R_B \Sigma x + 3R_3(x_1 + x_2) \right]$  |

П р и м е ч а н и я:  $\Sigma x x = x_1 x_2 + x_2 x_0 + x_0 x_1$   
 $\Sigma x = x_1 + x_2 + x_0$

**Схемы присоединения омметров.** Омметры включены на междуфазовые напряжения и разности соответствующих фазовых токов (рис. 6, *a*). Реактанс на клеммах омметров определяется по формулам

$$x_{pA} = \left[ \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_B}{i_A - i_B} \right]_{\text{мин. часть}} = \left| \frac{\dot{U}_{AB}}{\dot{i}_{AB}} \right| \sin (\dot{U}_{AB}, \dot{i}_{AB}) = \frac{U_{AB}}{I_{AB}} \sin \varphi_A.$$

Аналогично, для фаз *B* и *C*:

$$\left. \begin{aligned} x_{pB} &= \frac{U_{BC}}{I_{BC}} \sin \varphi_B, \\ x_{pC} &= \frac{U_{CA}}{I_{CA}} \sin \varphi_C. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Омметры включены на фазовые напряжения и фазовые токи при наличии токовой компенсации (рис. 6, *b*).

Реактанс на клеммах омметров определяется по формулам:

$$\left. \begin{aligned} x_{pA} &= \left[ \frac{\dot{U}_A}{i_A + k3i_0} \right]_{\text{мин. часть}} = \frac{\dot{U}_A}{|i_A + k3i_0|} \sin \varphi_A, \\ x_{pB} &= \frac{\dot{U}_B}{|i_B + k3i_0|} \sin \varphi_B, \\ x_{pC} &= \frac{\dot{U}_C}{|i_C + k3i_0|} \sin \varphi_C, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

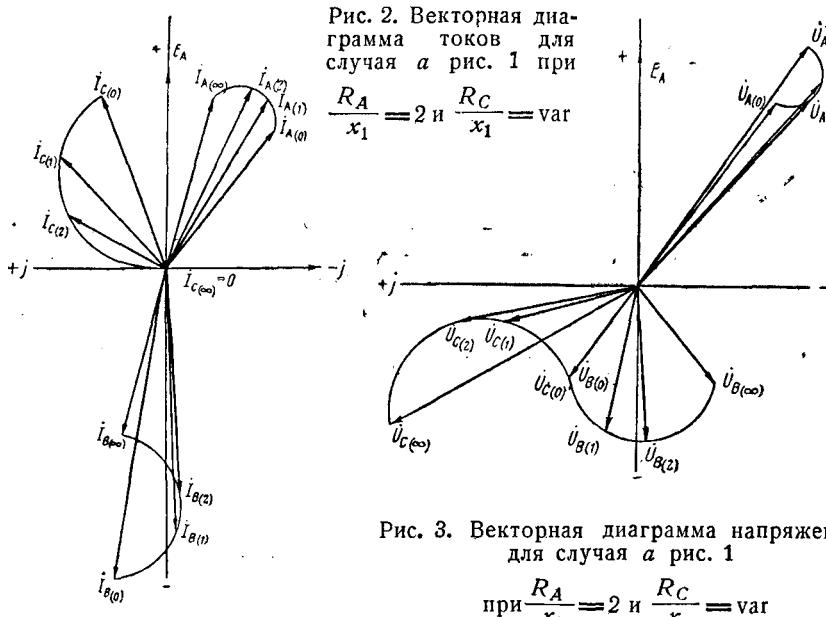


Рис. 2. Векторная диаграмма токов для случая *a* рис. 1 при  $\frac{R_A}{x_1} = 2$  и  $\frac{R_C}{x_1} = \text{var}$

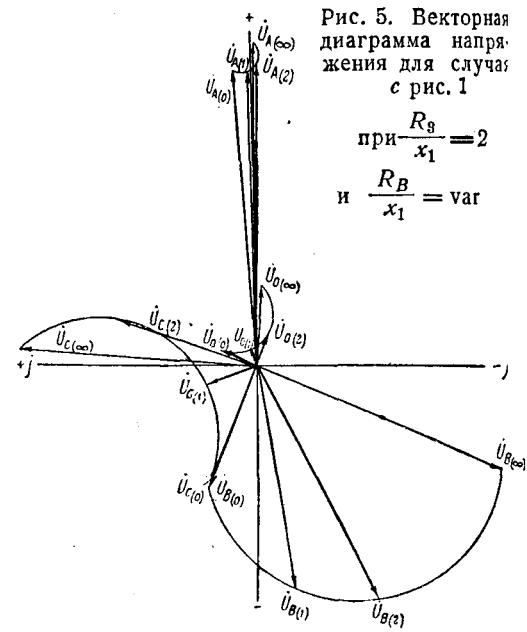


Рис. 5. Векторная диаграмма напряжения для случая *a* рис. 1 при  $\frac{R_B}{x_1} = 2$  и  $\frac{R_A}{x_1} = \text{var}$

Рис. 3. Векторная диаграмма напряжений для случая *a* рис. 1

при  $\frac{R_A}{x_1} = 2$  и  $\frac{R_C}{x_1} = \text{var}$

где

$$k = \frac{x_0 - x_1}{3x_1};$$

при  $x_0 = 3,5x_1$   $k = 0,83$ .

Методика вывода выражений для реактансов. Как было указано выше, реактанс на клеммах омметра определяется мнимой частью отношения вектора напряжения к вектору тока.

Во всех рассмотренных случаях замыканий через переходные сопротивления напряжения и токи представляются в общем виде следующими выражениями:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U} &= \frac{U_a + jU_r}{M + jN}, \\ I &= \frac{I_a + jI_r}{M + jN}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Поэтому с учетом вышеуказанного реактанс может быть получен следующим образом:

$$x_p = \left[ \frac{\dot{U}}{I} \right]_{\text{мин. часть}} = \left[ \frac{U_a + jU_r}{I_a + jI_r} \right]_{\text{мин. часть}}$$

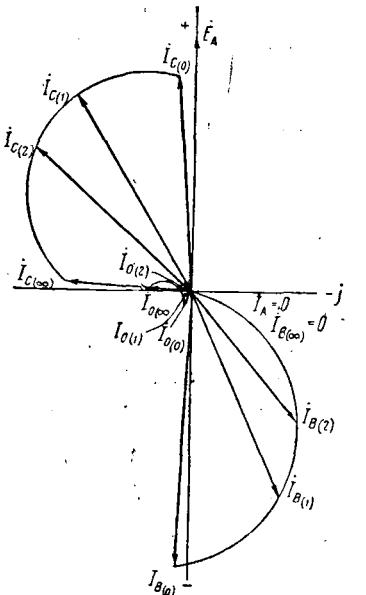


Рис. 4. Векторная диаграмма токов для случая *c* рис. 1 при  $\frac{R_B}{x_1} = 2$  и  $\frac{R_B}{x_1} = \text{var}$

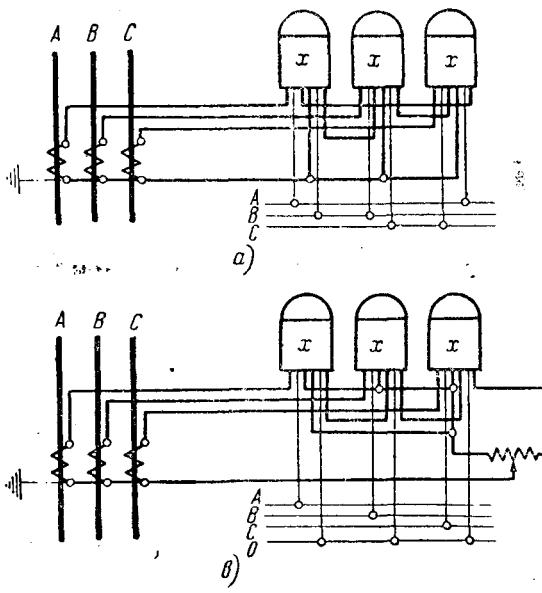


Рис. 6. Схемы присоединения омметров

$$x_p = \left[ \frac{(U_a + jU_r)(I_a - jI_r)}{I_a^2 + I_r^2} \right]_{\text{мин. часть}} = \frac{U_r I_a - U_a I_r}{I_a^2 + I_r^2}. \quad (9)$$

По этой формуле для всех рассматриваемых случаев можно вычислять реактанс аналитически. Реактанс можно вычислить также графически, на основании векторных диаграмм токов и напряжений, пользуясь выражениями (6) или (7).

Ниже приведены выражения для реактансов для наиболее характерных случаев, полученные на основании формулы (9), и выражений для токов и напряжений, приведенных в табл. 1–3 (при замыканиях в месте установки защиты).

Расчетный случай *a*. Омметры присоединены по схеме *a*, рис. 6:

$$\left. \begin{aligned} x_{pA} &= \left[ \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_B}{I_A - I_B} \right]_{\text{мин. часть}} = \\ &= -\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{R_A(3x_2^2 + R_A R_C)}{(R_A + R_C)^2 + 3(3x_2^2 + \sqrt{3}x_2 R_A + R_C^2)}, \\ x_{pB} &= \left[ \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_C}{I_B - I_C} \right]_{\text{мин. часть}} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

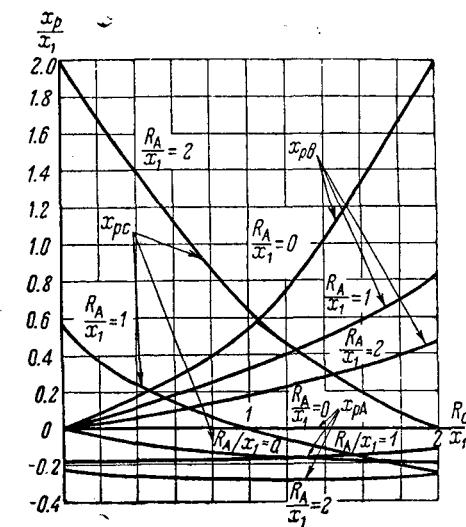


Рис. 7. Реактансы на клеммах омметров, включенных по схеме *a* рис. 6 для расчетного случая *a* рис. 1

$$x_{pB} = \frac{\sqrt{3}}{2} \left| \frac{R_C(3x_2^2 + R_A R_C)}{(R_A + R_C)^2 + 3(3x_2^2 - \sqrt{3}x_2 R_C + R_A^2)}, \right. \\ \left. x_{pC} = \left[ \frac{\dot{U}_C - \dot{U}_A}{i_C - i_A} \right]_{\text{миним. часть}} = \right| \quad (10)$$

$$= \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{(R_A - R_C)(3x_2^2 + R_A R_C)}{(R_A - R_C)(R_A - R_C - 3\sqrt{3}x_2) + 9x_2^2 + R_A R_C}.$$

Расчетный случай с. Омметр присоединен по схеме а рис. 6:

$$x_{pB} = \left[ \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_C}{i_B - i_C} \right]_{\text{миним. часть}} = \\ = -\frac{\sqrt{3}}{2} R_B \frac{x_2^2 + 2x_2 x_0 + (3R_3 - \sqrt{3}x_0) R_B}{\left( x_2 + 2x_0 + \frac{\sqrt{3}}{2} R_B \right)^2 + (6R_3 + 1,5R_B)^2}. \quad (11)$$

Омметры присоединены по схеме в рис. 6:

$$x_{pB} = \left[ \frac{\dot{U}_B}{i_B + k_3 i_0} \right]_{\text{миним. часть}} = \frac{(3R_3 - 2,5R_B) \left[ 1,5R_B(x_0 - \sqrt{3}R_3) - \frac{\sqrt{3}}{2}x_2(x_2 + 2x_0) \right]}{\left( \frac{\sqrt{3}}{2}x_2 + \sqrt{3}x_0 - 1,25R_B \right)^2 + (4x_2 + 3\sqrt{3}R_3 - 1,25\sqrt{3}R_B)^2}, \quad (12)$$

$$x_{pC} = \left[ \frac{\dot{U}_C}{i_C + k_3 i_0} \right]_{\text{миним. часть}} = \frac{1,5\sqrt{3}R_3(x_2^2 + 2x_2 x_0 + 3R_B R_3 - \sqrt{3}x_0 R_B)}{\left( \frac{\sqrt{3}}{2}x_2 + \sqrt{3}x_0 + 2,75R_B \right)^2 + (-4x_2 + 3\sqrt{3}R_3 + 2,75\sqrt{3}R_B)^2}. \quad (13)$$

**Анализ замеров реактанса.** При анализе замеров реактанса на клеммах реле, установленных непосредственно у места повреждения, можно руководствоваться следующим общим правилом.

Ошибка равна нулю в том случае, когда векторы напряжений и токов, подводимых к реле, совпадают по фазе. Ошибка имеет положительное значение, когда вектор напряжения, подводимого к реле, опережает вектора тока и имеет отрицательное значение, когда вектор напряжения отстает от вектора тока.

Пользуясь этим правилом и векторными диаграммами 2—5, можно составить себе представление о знаке реактанса на клеммах омметра при различных видах повреждений.

**Случай а** (рис. 1). При схеме присоединения омметров на междуфазовые напряжения и разность фазовых токов омметр фазы А дает отрицательную ошибку, фазы В — положительную и омметр фазы С — ошибку любого знака. В случае, когда  $R_A = R_B$  ошибка в фазе С равна нулю.

К тем же выводам можно притти, анализируя формулы (10).

**Случай с** (рис. 1). При схеме присоединения омметров с токовой компенсацией омметр фазы В может давать в замере реактанса ошибку любого знака, омметр фазы С — только положительную ошибку.

На рис. 7 и 8 представлены кривые реактансов на клеммах омметров, включенных по схемам а и в рис. 6; значения реактанса даны в относительных единицах (реактанс отнесен к реактансу положительной последовательности всей системы, приведенному к точке к. з.).

Параметры системы и все исходные данные приняты те же, что и при построении векторных диаграмм рис. 2—5. Предполагалось, что реактансовые реле установлены непосредственно около места повреждения.

Рис. 7 и 8 позволяют сделать некоторые выводы относительно практически возможных значений абсолютных ошибок.

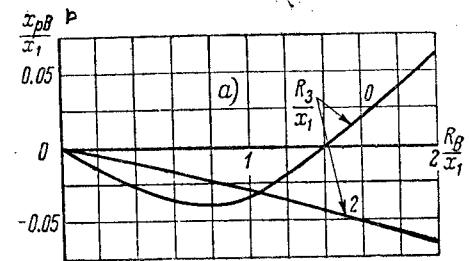
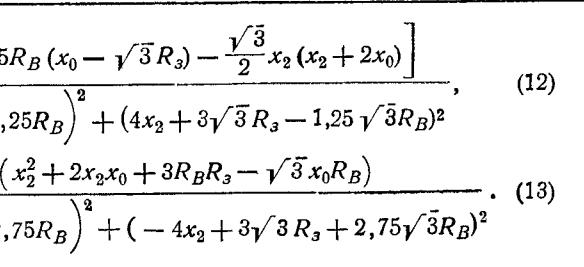
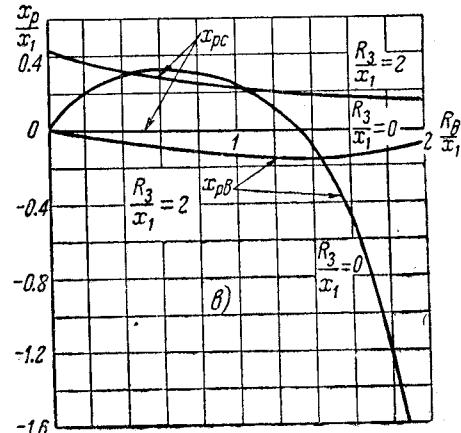


Рис. 8. Реактансы на клеммах омметров для расчетного случая с рис. 1.  
а) омметры включены по схеме а рис. 6,  
б) омметры включены по схеме в рис. 6



Замер первого реле в схеме а рис. 6 в рассматриваемом конкретном случае может быть меньше реактанса положительной последовательности всей системы  $x_1$ , примерно на 28%.

Согласно формуле (10) при  $R_A = R_C = R$

$$x_{pA} = -\frac{\sqrt{3}R(3x_2^2 + R^2)}{2[4R^2 + 3(3x_2^2 + \sqrt{3}x_2 R + R^2)]}. \quad (14)$$

Наибольшая ошибка соответствует условию  $\frac{dx_{pA}}{dx_2} = 0$ .

Решение данного уравнения дает  $x_2 = \frac{R}{\sqrt{3}}$ .

Подстановкой  $x_2$  в (14) получаем:  $x_{pA} = -\frac{\sqrt{3}}{9}R$ .

Аналогично можно проанализировать замеры реактанса во всех фазах.

Следует особо отметить, что формулами табл. 1 можно пользоваться для расчета несимметричного режима системы, обусловленного присоединением в одной точке группы неодинаковых сопротивлений.

#### Литература

1. M. Schleicher. Die moderne Selektivschutztechnik und die Methoden zur Fehlerortung in Hochspannungsanlagen, стр. 128—130, 1936.

2. В. Л. Фабрикант. Работа реактансной защиты при двухфазных замыканиях на землю и замыканиях между тремя фазами. Журн. „Электрические станции“ № 6, 1938.

## О пересмотре стандарта на силовые кабели\*

Канд. техн. наук, доц., В. А. ПРИВЕЗЕНЦЕВ и инж. С. Б. МИНЦ  
Завод „Москабель“

Стандарт на силовые кабели является одним из самых важнейших стандартов электропромышленности. Он касается основных и наиболее ценных изделий кабельной промышленности. Стоимость выпуска этих изделий огромна, — она исчисляется многими десятками миллионов рублей в год.

Существующий ОСТ 6260 на силовые кабели действует около 7 лет. Уже к моменту выпуска его выяснилась необходимость скорого пересмотра. С течением времени, когда наша кабельная промышленность добилась известных технических успехов, возникла настоятельная необходимость в пересмотре стандарта. В последние 3—4 года было сделано несколько попыток создать новый стандарт, однако все они кончились неудачей, как из-за недоработанности ряда основных положений, так и из-за отсутствия между кабельными заводами и основными потребителями единых точек зрения по основным вопросам стандарта.

Ниже мы приводим основные положения, которые по нашему мнению должны быть положены в основу пересмотра стандарта. Многочисленных второстепенных и редакционных изменений, которые также, безусловно, должны быть внесены в проект нового стандарта, мы здесь не касаемся.

**Раздел «Классификация».** 1. В новом проекте стандарта для кабелей напряжением до 10 кВ включительно достаточно предусмотреть выпуск кабелей с незаземленной нейтралью, так как практика показала совершенную нецелесообразность стандартизации таких кабелей с заземленной нейтралью.

Наши кабельные заводы такие кабели почти не изготавливают, так как в Союзе 6 и 10-кВ сети, как правило, не работают с глухо заземленной нейтралью.

2. Должны быть стандартизованы 35-кВ кабели с незаземленной нейтралью, выпускаемые в настоящее время в большом количестве нашими кабельными заводами; качество этих кабелей достаточно исследовано для введения их в стандарт.

3. В трехфазных кабелях с сечением жил 6, 10 и 16 мм<sup>2</sup> нужно предусмотреть применение круглых однопроволочных жил, так как практика показала, что применение сплошных секторных жил таких малых сечений никакого экономического эффекта не дает, а только ухудшает качество кабелей.

4. Необходимо включить указания относительно конструкций силовых кабелей для вертикальных прокладок. Исследование таких кабелей еще не совсем закончено, но все же полученные материалы достаточно для стандартизации таких конструкций. Этим мероприятием будут устранены те многочисленные недоразумения, которые сейчас имеют место при заказах и монтаже кабелей при вертикальных прокладках.

5. Наконец, должен быть уточнен и увязан с практикой работы кабельных заводов и кабель-

ных сетей ассортимент кабелей по сечениям. Количество марок может быть резко снижено без какого-либо уменьшения ассортимента исключением обозначений формы жилы, так как для всех кабелей с поясной изоляцией можно предусмотреть только секторные жилы, за исключением сплошных жил малых сечений (до 16 мм<sup>2</sup> включительно), которые должны состоять из одной круглой проволоки.

**Раздел «Технические условия».** 1. Основным изменением технических условий является принятие перераспределенной изоляции для кабелей с поясной изоляцией.

Основанием к этому служат результаты длительных исследований кабелей различных конструкций на напряжение в 6—10-кВ, проведенных кабельной лабораторией ВЭИ и заводом «Москабель». Результаты этих работ показывают, что кабели с перераспределенной изоляцией имеют значительно большую электрическую прочность при нормальных условиях их работы, чем кабели по ОСТ 6260, и обладают вполне достаточным запасом прочности при всех видах возможных перенапряжений, включая длительную работу с заземленной фазой, коммутационные перенапряжения и т. п.<sup>1</sup>.

Разработанные у нас новые конструкции имеют толщину поясной изоляции в 2,0—2,8 раза большую, чем это предусматривают последние немецкие нормы, и не должны вызывать опасений при временных заземлениях фаз и т. п. В соответствии с решениями, принятыми для 6 и 10-кВ кабелей, имеется возможность несколько уменьшить толщину поясной изоляции и у 3-кВ кабелей, оставив толщину фазовой изоляции неизменной. Наиболее рациональными толщинами изоляции, которые должны быть стандартизированы в новом стандарте, мы считаем:

|                            |      |         |          |    |
|----------------------------|------|---------|----------|----|
| Для 3-кВ кабелей — фазовая | 1,25 | поясная | 0,95—1,0 | мм |
| 6-кВ " "                   | 2,20 | "       | 1,0—1,05 | "  |
| 10-кВ " "                  | 3,00 | "       | 1,4      | "  |

Введение перераспределенной изоляции одновременно дает большую экономию за счет уменьшения габаритов и снижения расхода цветных металлов.

2. Точно так же необходимо изменить толщину изоляции у 20 и 35-кВ кабелей. По существующему ОСТ 6260 и техническим условиям наших кабельных заводов для этих кабелей приняты одинаковые толщины изоляции, независимо от сечения токопроводящих жил. Кроме того, эти толщины, как правило, выше величин, принятых авторитетными заграничными фирмами. Поэтому некоторое уменьшение толщины изоляции этих кабелей нам кажется также, безусловно, целесообразным.

Современное учение об электрической прочности

<sup>1</sup> Все эти вопросы детально освещены в ряде работ, опубликованных за последнее время, см. например, статью Городецкого и Войдена. «Бюллетень ВЭИ» № 1, 1940; статью Привезенцева. «Электричество» № 6, 1940 г., журнал завода «Москабель» № 4, 1939.

\* В порядке обсуждения. Редакция.

кабеля уделяет весьма большое внимание максимальным градиентам в изоляции. Как показал Робинсон, очень часто электрическая надежность кабеля определяется максимальными градиентами на поверхности жилы.

Более или менее точное определение оптимальных толщин изоляции возможно только после большой исследовательской работы, включающей изучение поведения кабелей во время их испытания на ускоренное старение. Однако и до окончания соответствующих работ можно произвести частичное снижение толщины изоляции, установив ее для крупных сечений таким образом, чтобы максимальные градиенты в этом случае не превышали градиентов у кабелей малых сечений с существующей толщиной изоляции.

Таким образом в настоящее время можно временно рекомендовать следующие толщины изоляции 20 и 35-кВ кабелей.

| Напряжение между токопроводящими жилами, кВ | Поперечное течение жил $\text{mm}^2$ | Нейтраль землена | Нейтраль не заземлена |
|---|--------------------------------------|------------------|-----------------------|
| 20  | 25—95                                | 6                | 8                     |
| 20  | 120—400                              | 6                | 7                     |
| 35  | 70—95                                | 9                | 12                    |
| 35  | 120—300                              | 9                | 10                    |

3. Существенно сделать в новом проекте стандарта указания относительно кабелей для вертикальных прокладок.

На основании проведенных в последнее время работ можно считать, что при вертикальных прокладках силовых кабелей можно добиться положительных результатов, применяя в качестве изоляции лакоткань или пропитанную кабельную бумагу с последующей осушкой. Нужно, однако, отметить, что, несмотря на превосходные механические свойства и достаточно надежные электрические характеристики, изоляцию из лакоткани можно рекомендовать только для отдельных специальных прокладок. Для массовых вертикальных прокладок (шахты и т. п.) лакоткань неприемлема из-за своей весьма высокой стоимости. Поэтому наиболее целесообразно применить кабели с отдельно освинцованными фазами, с осущененной бумажной изоляцией. Толщина изоляции должна быть выбрана с тем расчетом, чтобы исключить возникновение ионизации во внутренних бумажных слоях при наличии значительных воздушных включений. Для этого достаточно взять толщину изоляции фаз 6-кВ кабелей в 4,4  $\text{mm}$  и для 10-кВ кабелей — 7  $\text{mm}$ . Кроме того, для прокладки 6-кВ кабелей при сравнительно небольших разностях уровней (до 30 м) можно рекомендовать применение кабелей нормальной конструкции с толщиной осущеной изоляции, принятой для 10-кВ кабелей (см. стр. 42).

Здесь имеется в виду, что перераспределенная изоляция создает достаточно благоприятные условия для таких кабелей при эксплуатации. В частности, толщина фазовой изоляции в 3  $\text{mm}$  исключает возможность появления ионизации и старения кабеля при эксплуатации его под напряжением в 6 кВ.

Мы не даем никаких указаний относительно применения для вертикально прокладываемых кабелей особо вязкой пролитки.

Имеющийся в нашем распоряжении материал и проведенные в электротехнической лаборатории завода «Москабель» исследования не дают уверенности в надежности работы таких кабелей, так как, несмотря на повышенную вязкость массы, устранить ее стекание вниз по кабелю не удается.

4. Новый проект стандарта должен предусмотреть возможность прокладки кабелей при 0° С. В результате двухлетней работы электротехнической лаборатории завода «Москабель» было установлено, что хрупкость пропитанной бумажной изоляции возрастает лишь при температурах ниже —5° С. Одновременно была установлена возможность прокладки наших кабелей при 0° С, что позволит значительно увеличить длительность сезона монтажных работ.

5. Наконец, в новом проекте стандарта должны быть предусмотрены ограничения в отношении количества совпадений зазоров бумажной изоляции, надрывов, трещин и т. п.

Проведенными нами исследованиями установлено, что влияние совпадений на снижение электрической прочности пропитанной бумажной изоляции усиливается, если совпадения прилегают непосредственно к токоведущей жиле или если имеется подряд совпадение нескольких бумажных лент. Это вполне согласуется с выводами, сделанными Робинсоном при изучении механизма пробоя кабелей с пропитанной бумажной изоляцией. Поэтому мы полагаем целесообразным установить следующие допустимые числа совпадений бумажных лент:

Таблица

| Номинальное напряжение, кВ  | Общее число совпадений в изоляции жила — жила или жила — пояс | Максимальное число совпадений в изоляции одной жилы | Максимальное число совпадений в изоляции одного пояса |
|---|---|---|---|
| <b>I. Многожильные кабели не более трех</b>                               |   |   |   |
| 1   | 5   | 3   | 2   |
| 3   | 6   | 4   | 2   |
| 6   | 6   | 4   | 2   |
| 10  | 6   | 4   | 2   |
| <b>II. Одножильные кабели и кабели с отдельными освинцованными жилами</b> |   |   |   |
| 1—3   | —   | 8   | —   |
| 6—10  | —   | 4   | —   |
| 20  | с заземленной нейтралью                                       | 5   | —   |
| 20  | с незаземленной нейтралью                                     | 6   | —   |
| 35  | с заземленной нейтралью                                       | 6   | —   |
| 35  | с незаземленной нейтралью                                     | 6   | —   |

Одновременно необходимо сделать указания, что совпадения двух первых, примыкающих к жиле лент для 10-кВ кабелей не допускаются, равно не должно допускаться одновременное совпадение более трех лент.

Наконец, должны быть введены ограничения относительно продольных трещин в бумажной изоляции и надрывов по краям бумажных лент. Трещины длиной в 40—50  $\text{mm}$  и выше должны рассматриваться как совпадения. Точно так же должны быть введены ограничения в отношении надрывов длиной более 7—8  $\text{mm}$ . Более мелкие надрывы, конечно, также нежелательны, хотя исследования, проведенные в электротехнической лаборатории за-

вода «Москабель», не дали результатов, с помощью которых можно было бы оценить влияние таких надрывов.

6. По существу ОСТ 6260 при вертикальных прокладках на высоту более 15 м должны применяться кабели с проволочной броней. Между тем работами завода «Москабель», а также 5-летней практикой московского метрополитена показана полная возможность применения кабелей с ленточной броней при условии крепления кабеля в специальных зажимах через каждые 1,5—2 м кабеля. Такие прокладки для высот не более 50 м нужно допустить. Мы обращаем на это обстоятельство особое внимание, так как до последнего времени затруд-

нения с изготовлением кабелей проволочной броней очень часто тормозили монтаж участков кабельных линий.

7. Мы не касаемся здесь толщины свинцовых оболочек и нагрузок. Эти исключительно важные моменты, возможно, будут отражены специальными статьями работников завода «Севкабель» и ВЭИ.

Укажем только в заключение, что некоторые изменения должны быть внесены в методику электрических испытаний силовых кабелей как при сдаче кабелей, так и после окончания монтажа (снижение испытательного напряжения 35-kV кабелей переменным током до 65-kV, повышение длительности испытания постоянным током и т. п.).

## Образование пустот в кабеле

Проф. С. М. БРАГИН

Московский энергетический институт им. Молотова

1. Многочисленные исследования, проведенные в лабораториях кабельных заводов и научно-исследовательских институтах Европы и Америки за время с 1917 по 1927 гг., показали, что основной причиной, приводящей к преждевременному пробою высоковольтного кабеля, является наличие в нем газовых включений. Иначе говоря, недостатком изолирующего слоя современных высоковольтных кабелей с вязкой пропиткой является наличие в нем газовых включений в виде тонких пленок и пузырьков.

Для повышения электрической прочности и надежности работы кабеля нужно или исключить возможность появления газовых включений в процессе изготовления кабеля и во время его эксплуатации, или повысить электрическую прочность этих включений.

Первое решение привело к маслонаполненному кабелю, вполне оправдавшему себя для использования при высоком рабочем напряжении (до 220 kV включительно). Второе решение сводится к применению повышенного давления, затрудняющего развитие ионизации в газовых включениях изолирующего слоя, а также специальных газов, имеющих повышенный потенциал ионизации.

Сложность и дороговизна аппаратуры маслонаполненного кабеля делает неэкономичным использование подобной конструкции для средних напряжений 10—35 kV. Для примера приводим рис. 1, сравнение стоимости подземной кабельной линии, проложенной в блоках, в зависимости от величины рабочего напряжения для кабеля обычного типа — с вязкой пропиткой (кривая *a*) и маслонаполненного (кривая *b*), взятое нами из

статьи Шанклина [1]. Кривые рис. 1 показывают, что для рабочего напряжения 40 kV и ниже применение маслонаполненного кабеля невыгодно.

С другой стороны, именно задача повышения электрической прочности и надежности работы кабелей на средние напряжения представляет наибольший интерес с народнохозяйственной точки зрения, так как протяженность кабельных сетей среднего напряжения (10—35 kV) значительно превышает протяженность кабельных линий высокого напряжения (60—220 kV).

Например, толщина изолирующего слоя кабеля с вязкой пропиткой марки ОСБ на напряжение 35 kV для сетей с незаземленной нейтралью составляет 12 mm, что почти равно толщине изолирующего слоя маслонаполненного кабеля на рабочее напряжение 110 kV — 13—12 mm. Если бы толщину изолирующего слоя 35-kV кабеля с 12 mm можно было бы уменьшить до 8 mm, то экономия только на свинце составила бы около 30%, другими словами, только за счет этого мероприятия можно было бы увеличить выпуск 35-kV кабелей на 30% при том же расходе свинца. Этот пример иллюстрирует крайнюю необходимость радикального улучшения электрических характеристик, принятых конструкций силовых кабелей на средние напряжения — 10—35 kV.

Учитывая потребность в кабеле для вертикальной прокладки и все более распространяющуюся прокладку 6-kV кабеля при разности уровней обоих концов кабеля более чем на 10—15 m, можно сделать заключение о необходимости и актуальности борьбы с ионизацией в изолирующем слое низковольтных кабелей, в особенности это относится к кабелям, прокладываемым на вертикальных и кругонаклонных трассах, где образование пустот облегчается условиями прокладки.

2. Рассмотрим процесс образования пустот в кабеле при изготовлении его.

По окончании процесса сушки в изолирующем слое кабеля остается некоторый объем газа — воздуха, зависящий от объема изолирующего слоя, его плотности и давления в вакуум-котле в конце сушки.

Обозначим через  $V$  объем газа в изолирующем слое кабеля на единицу длины, т. е. положим  $V$

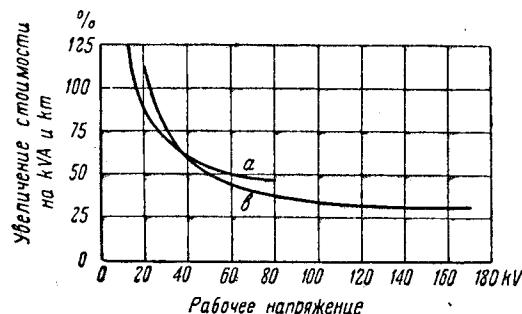


Рис. 1

а — кабель с вязкой пропиткой; *b* — маслонаполненный кабель

Вологодская областная универсальная научная библиотека

равным произведению из объема изолирующего слоя на его коэффициент плотности, понимая под последним отношение объема газа в изолирующем слое к объему, заключенному между токопроводящими жилами и внутренней поверхностью свинцовой оболочки.

Применяя закон Бойль-Мариотта, можем написать следующее уравнение:

$$p_c V = 760 \cdot \Delta V, \quad (1)$$

где  $p_c$  — давление в котле в конце сушки в  $\text{mmHg}$ ,  $\Delta V$  — остаточный объем газа в кабеле, приведенный к 760  $\text{mm}$ .

Это уравнение относится к температуре сушки  $\Theta_c$ . По окончании сушки при той же температуре  $\Theta_c$  подается в котел с кабелем масло-канифольный состав для пропитки бумажного слоя.

Объемное содержание газа, растворенного в пропитывающем составе, обозначим в долях от объема состава через  $a$  и отнесем к 760  $\text{mm}$ .

Максимальное количество газа, которое может быть растворено в масло-канифольном составе или чистом минеральном масле в долях от объема последнего, как известно, не зависит от давления газа, а только от природы газа и носит название коэффициента растворимости. Для воздуха коэффициент растворимости составляет 0,13. Это значит, что при любом давлении объем растворенного в масле воздуха будет равен 13% объема масла.

Если масло или масло-канифольный состав, содержащий воздух, подвергнуть длительной обработке под вакуумом, равным, например, 60  $\text{mmHg}$ , то объем растворенного газа при этом давлении согласно вышесказанному будет также составлять 13% от объема масла. Очевидно, что количество растворенного газа в обработанном под вакуумом пропитывающем веществе, если мы его предохраним от соприкосновения с воздухом, будет при атмосферном давлении составлять только часть от максимально возможного содержания газа. В данном случае вместо 13% после дегазации при 60  $\text{mm}$  останется только около 1% газа, следовательно, для такого дегазированного пропитывающего вещества  $a=0,01$ .

Если кабель пропитывается дегазированным составом или маслом, то для давления в пустотах изолирующего слоя можно написать следующее уравнение:

$$p_v (V_v + a_{\max} V_k) = 760 (\Delta V + a V_k), \quad (2)$$

где  $p_v$  — давление в пустотах кабеля,  $V_v$  — объем пустот в кабеле,  $V_k$  — объем пропитывающего состава в кабеле, практически равный объему  $V$ .

Это уравнение говорит, что при достаточно глубоком вакууме в конце сушки, порядка 1  $\text{mm}$ , давление в пустотах будет близко к тому, при котором пропитывающее вещество подвергалось дегазированию. Количество газа, содержащегося в пустотах и растворенного в пропитывающем веществе, равно количеству газа, оставшегося в конце сушки и внесенного пропитывающим веществом.

Обозначим отношение объема пропитывающего вещества к объему пустот через  $R$ :

$$R = \frac{V_k}{V_v} \approx \frac{V}{V_v}, \quad (3)$$

так как объем пустот весьма мал по сравнению с объемом пропитывающего вещества [2].

Уравнение (2) теперь можно переписать в следующем виде:

$$p_v = \frac{760 (a + \frac{\Delta V}{V}) R}{1 + a_{\max} R}. \quad (4)$$

Подставив из уравнения (1)  $\frac{\Delta V}{V} = \frac{p_c}{760}$  в уравнение (4), получим следующее выражение для давления в пустотах:

$$p_v = \frac{(760 \cdot a + p_c) R}{1 + a_{\max} R}. \quad (5)$$

Таким образом давление в пустотах изолирующего слоя является функцией отношения объема пустот к объему пропитывающего вещества и зависит от начального и конечного содержания газа, растворенного в пропитывающем веществе и, кроме того, от давления в конце сушки кабеля.

Из (5) нетрудно видеть, что с увеличением  $R$ , с уменьшением процента пустот в кабеле — давление в пустотах стремится к некоторому пределу

$$p_{v \lim} = \frac{760 a + p_c}{a_{\max}} \text{ или при } p_c \rightarrow 0 \quad p_k = \frac{760 a}{a_{\max}}. \quad (6)$$

Этот предел будет иметь тем меньшее значение, чем более дегазировано пропитывающее вещество и чем более глубокий вакуум был применен в конце процесса сушки. Очевидно, что при давлении в пустотах меньше  $p_k$  газ из пропитывающего состава может выделяться, повышая давление в пустотах. Это может произойти в том случае, когда давление в конце сушки меньше критического, т. е. если  $p_v < p_k$ . Давление в пустотах будет заключаться в пределах  $p_k > p_v > p_c$ .

После окончания сушки, пропитки и охлаждения кабеля давление в пустотах, прилегающих к медной жиле и в наружных слоях изолирующего слоя, выравнивается и с течением времени может дойти до внешнего давления — до атмосферного, если в конце пропитки не было применено более высокое давление. В середине изолирующего слоя давление в пустотах будет равно величине  $p_v$ , определяемой из уравнения (5).

3. Процесс пропитки изолирующего слоя кабеля в том случае, когда пропитка производится под вакуумом, идет только за счет всасывания пропитывающего вещества капиллярами бумаги, так как давление на пропитывающий состав будет практически то же, как и давление в пустотах. При капиллярном всасывании пропитывающее вещество, входя в капилляр, вытесняет из него заполнивший его ранее газ. Вытесненный газ может собраться в каком-либо месте изолирующего слоя, что поведет к образованию пустот в изолирующем слое кабеля.

При пропитке только за счет капиллярных сил, очевидно, останутся незаполненными все газовые включения, уже существовавшие в изолирующем слое, например, в стыках бумажных лент, а также и вновь образовавшиеся при пропитке газовые мешки и включения.

Процесс пропитки, происходящий из-за абсорбции бумаги, может быть легко выражен математически в зависимости от линейных размеров пропитываемой бумаги, ее плотности, проницаемости, а также вязкости пропитывающего вещества при температуре пропитки.

Если наблюдать скорость абсорбции масла стопкой бумаги, составленной из нескольких сложенных вместе листков, при общей толщине  $\Delta$  и поверхности  $F$ , то можно будет заметить, что пропитывающий состав, подведенный к одной стороне стопки, будет постепенно распространяться в объеме пропитываемой бумаги и за время  $t$  пройдет на расстояние  $x$  от смачиваемой пропитывающим веществом поверхности [3].

Обозначим через  $\eta_P$  — вязкость пропитывающего состава,  $P$  — проницаемость бумаги,  $p$  — давление, под которым подводится пропитывающий состав (разность уровней), тогда время, необходимое пропитывающему составу для того, чтобы проникнуть на расстояние  $dx$ ,

$$dt = \frac{\eta x}{PFp} kF dx.$$

Интегрируя это выражение в пределах  $x=0$  и  $x=\Delta$ , получим время, необходимое для проникновения жидкости через всю толщу бумаги  $\Delta$ :

$$t = \frac{1}{2P} \cdot \frac{k\Delta^2}{p}. \quad (7)$$

Здесь коэффициент  $k$  равен приблизительно 0,5, а под  $p$  следует подразумевать давление, действующее на слой бумаги, когда уровень жидкости равен нулю, т. е. давление, определяющее абсорбцию  $p_0$  (рис. 2). Это давление для масла равно примерно давлению столба масла высотой 23 см (высота всасывания).

На основании изложенных выше соображений найдем порядок времени, необходимого для всасывания пропитывающего состава бумагой. Пример, следующие значения величин:  $\eta = 0,50$  пуз.,  $P = 30 \cdot 10^{-12}$ ,  $k = 0,5$ ,  $\Delta = 0,5$  см,  $p = 23 \cdot 0,9 \cdot 981 \approx 2 \cdot 10^4$  dyn/cm<sup>2</sup>.

При этих условиях из уравнения (7) получим:  $t = 14,5$  h.

Время—значительное, и поэтому для ускорения пропитки нужно создавать разность давлений, действующую на пропитывающее вещество. На практике пропитка за счет капиллярного всасывания может иметь место, когда давление в газовых включениях внутри пропитываемого слоя равно внешнему давлению на пропитывающий состав,—когда разность давлений внешнего и внутреннего равна нулю. Такое состояние может получиться, когда пропитка проводится под тем же разреженным давлением, при котором происходила сушка бумаги, а также при проварке кабелей в пропитывающем веществе под атмосферным давлением, без предварительной вакуумной обработки.

При наличии разности давлений, действующих на пропитывающий состав, он, преодолевая сопротивление бумажного слоя, подается в пустоты и заполняет их. С этой точки зрения нужно стремиться к возможно более глубокому вакууму в конце сушки порядка 1—2 mm и применению хорошо дегазированного пропитывающего вещества, тогда давление в пустотах будет достаточно низким, а разность давлений на пропитывающее вещество значительно повышена. В результате под влиянием этой разности давлений пропитывающее вещество будет подаваться в изолирующий слой и заполнять имеющиеся в нем пустоты.

Если же пропитывающий состав был насыщен воздухом, то в образовавшихся пустотах изолирующего слоя установится давление, близкое

к атмосферному, и, следовательно, разность давлений на пропитывающий состав будет близка к нулю. Сила, побуждающая пропитывающий состав преодолевать сопротивление бумажного слоя, будет крайне незначительна и практически равна нулю, поэтому пустоты в изолирующем слое кабеля останутся незаполненными, хотя основная масса изолирующего слоя все же пропитается за счет капиллярного всасывания.

Отсюда следует сделать тот вывод, что качество пропитки силовых кабелей в сильной степени зависит не только от глубины вакуума при сушке, но и от применения тщательно дегазированного пропитывающего вещества. В тех случаях, когда не требуется заполнение всех пустот в изолирующем слое, например, при изготовлении кабелей с так называемой „обедненной“ пропиткой, очевидно, нет необходимости применять глубокий вакуум при сушке и дегазированный пропитывающий состав, наоборот, при ухудшенном вакууме (порядка 50—100 mm) и насыщенном воздухом пропитывающем составе имеющиеся в изолирующем слое пустоты не заполняются, и процесс обеднения, проводимый при более глубоком вакууме, более эффективен, так как имеющиеся в изолирующем слое остатки воздуха выталкивают пропитывающий состав из изолирующего слоя. На этой основе и следовало бы разрабатывать рациональный режим сушки и пропитки кабелей с обедненной изоляцией.

4. Поток жидкости через пористую среду определяется законом Дарси:

$$\nu = \left( -\frac{h}{\eta} \right) \nabla p, \quad (8)$$

где  $\nu$ —вектор скорости потока жидкости,  $p$ —давление жидкости,  $\eta$ —вязкость жидкости,  $h$ —коэффициент проницаемости, представляющий постоянную потока жидкости, через пористую среду.

Коэффициент  $h$  можно определить как объем гомогенной жидкости с вязкостью единицы, проходящей через единицу поверхности в единицу времени под действием единицы градиента давления.

Рассмотрим приближенно условия пропитки под действием градиента давления, созданного в изолирующем слое разностью давлений, действующих на пропиточный состав извне и в пустотах.

Количество пропиточного состава, которое должно пройти через цилиндрическую поверхность радиуса  $x$  (рис. 3), за все время пропитки  $t$  обозначим через  $Q_x$ . Предполагаем, что вся пропитка идет только за счет подачи пропиточного вещества через изолирующий слой кабеля по направлению от периферии к центру кабеля, с некоторой равномерной скоростью  $q_x$ , отнесенной к единице поверхности, через которую рассматривается поток жидкости.

Очевидно

$$Q_x = k\pi(x^2 - r^2), \quad (9)$$

где  $r$  — радиус жилы кабеля,  $k$  — коэффициент заполнения объема изолирующего слоя пропитывающим веществом, обычно принимаемый равным 0,5.

Применяя закон Дарси к поперечному сечению рассматриваемого кабеля и отнеся уравнение к полярным координатам, получим следующее

выражение для скорости потока в радиальном направлении от периферии к центру:

$$V_r = \frac{k}{\eta} \frac{dp}{dx}. \quad (10)$$

Чтобы приравнять друг другу уравнения (9) и (10), нужно обе части уравнения (9) разделить на  $2\pi x$  и на общую длительность пропитки  $t$  для объема, лежащего между радиусами  $x$  и  $r$ , т. е. вместо объема пропитывающего состава за все время пропитки ввести среднюю радиальную скорость подачи пропитывающего вещества через единицу поверхности. Получим:

$$\frac{Q_x}{2\pi x t_x} = V_x = \frac{k}{t_x} \left( \frac{x}{2} - \frac{r^2}{2x} \right). \quad (11)$$

Следовательно, приравнивая (11) и (10), найдем, что время пропитки

$$t_x = \frac{k\eta}{h dp} \left( \frac{x dx}{2} - \frac{r^2}{2} \frac{dx}{x} \right). \quad (12)$$

Для всего объема изолирующего слоя кабеля полное время пропитки получим, проинтегрировав (12) в пределах от  $r$  до  $R$  и подставив вместо  $dp$  разность давлений  $\Delta p$ :

$$T = \frac{k\eta}{4 \cdot h \Delta p} \left[ R^2 - r^2 - 2r^2 \ln \frac{R}{r} \right] = \\ = \frac{k\eta}{4 \cdot h \Delta p} \left[ R^2 - r^2 \left( 1 + 2 \ln \frac{R}{r} \right) \right]. \quad (13)$$

Вычислим теперь примерную длительность пропитки для средних производственных условий, ориентируясь на 35-кВ кабель. Положим  $r=0,7$  см,  $R=1,6$  см,  $k=0,5$ ,  $\eta=0,5$  пуаз и  $h=24 \cdot 10^{-12}$  [Race, 4], тогда общая длительность пропитки в часах выразится в зависимости от  $\Delta p$  следующим уравнением:

$$T = \frac{0,5 \cdot 0,5}{4,24 \cdot 10^{-12} \cdot 3600 \Delta p} \left[ 1,6^2 - 0,7^2 \left( 1 + 2 \ln \frac{1,6}{0,7} \right) \right] = \\ = \frac{0,905 \cdot 10^6}{\Delta p}.$$

В этом уравнении  $\Delta p$  должно быть выражено в дюй/см<sup>2</sup>, если  $\eta$  в пуазах, а линейные размеры в см. Следовательно, общее время пропитки, выраженное в часах, найдем из уравнения:

$$T \approx \frac{0,9}{\Delta p}. \quad (14)$$

Следовательно, чем меньше разность давлений, действующих на пропитывающий состав снаружи и изнутри кабеля, тем больше общее время пропитки. При достаточно глубоком вакууме в конце сушки — порядка 1 мм — можно  $\Delta p$  положить равной 1 ат, тогда общее время пропитки будет близко к одному часу. Время пропитки по сравнению со случаем пропитки за счет капиллярного всасывания получается значительно меньшим, и значит в этом именно направлении нужно вести исследовательскую работу, чтобы

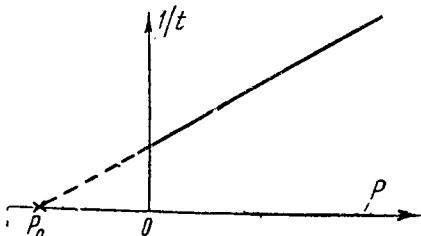


Рис. 2

Рис. 3

добиться максимального сокращения длительности этой операции при хорошем качестве выпускемых кабелей. Из уравнения (4) следует, что давление в пустотах  $p_v$  делается равным атмосферному при

$$R = \frac{p_v}{760 \cdot a + p_c - p_v a_{max}} = \frac{1}{a - a_{max} + \frac{p_c}{760}}. \quad (15)$$

Если допустить, что пропитка производится не дегазированным составом, следовательно,  $a = a_{max} = 0,13$  (для воздуха), то при  $p_c \approx 50$  мм, что отвечает средним условиям сушки силовых кабелей, — получим  $R \approx 15$ . Это значит, что пропитка прекратится, когда в изолирующем слое останется еще  $\frac{1}{R} = \frac{1}{15} \approx 6,7\%$  пустот.

Углубление вакуума до 10 мм позволит уменьшить процент пустот до 1,3%, тогда как введение дегазированного пропитывающего состава позволит даже при том же вакууме  $p_c = 10$  мм довести процент пустот до нуля; так как давление в пустотах никогда не может превзойти парциальное давление газа, растворенного в дегазированном пропитывающем веществе, что обуславливает продолжение пропитки под действием не уменьшающейся разности давлений до тех пор, пока пустот в кабеле совсем не останется.

Предельные условия для обеспечения полноты пропитки найдем из уравнения (15), а именно:

$$R = \infty \text{ при } a - a_{max} + \frac{p_c}{760} = 0.$$

Следовательно, при  $a_{max} = 0,13$

$$a + \frac{p_c}{760} = 0,13. \quad (16)$$

Графически это уравнение изображено на рис. 4, где видно, что при значениях  $p_c > 100$  мм вообще невозможно избежать пустот в кабеле, так как для этого нужно было бы применить полностью дегазированный пропитывающий состав, что практически не осуществимо.

При наличии очень хорошо дегазированного пропитывающего состава с объемным содержанием воздуха  $a = 0,01$  возможно получение хорошо пропитанного кабеля при вакууме не выше 90 ммHg. При пропитывающем составе средней степени дегазации, например при  $a = 0,05$ , предельное давление в котле в конце сушки должно быть не выше 60 мм.

Если применяется совсем недегазированный пропитывающий состав, то все же при нагревании его примерно на 100°C, вследствие изменения плотности растворенного воздуха, содержание

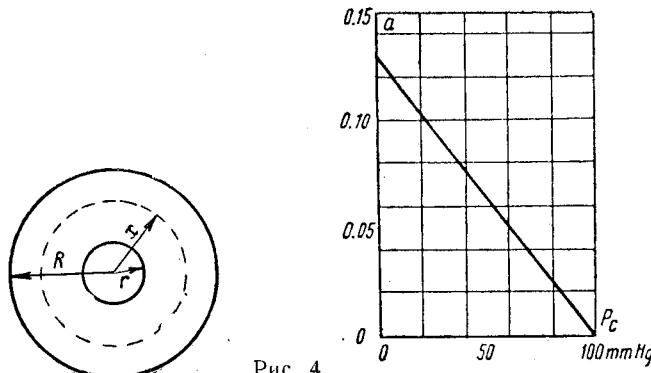


Рис. 4

его в пропитывающем веществе будет меньше  $a_{\max}$ . В самом деле, изменение объема газа при нагревании определяется уравнением:

$$V_{120} = V_{20} \cdot \left[ 1 + \frac{100}{273} \right] = 1,36 \cdot V_{20},$$

т. е. объем увеличивается на 36% и, следовательно,  $p = \frac{760}{1,36} = 560$  mm; отсюда можно было бы вычислить содержание растворенного в пропитывающем веществе воздуха,

$$a = \frac{560}{760} \cdot a_{\max} \approx 0,10 \text{ при } a_{\max} = 0,13.$$

Из рис. 4 следует, что для  $a = 0,1$  нужно было бы применить вакуум порядка 20 mm, однако дегазация пропитывающего вещества при одном только нагревании даже и под вакуумом, но без перемешивания и растягивания в пленки, как обычно делается при дегазировании, не дает удовлетворительного результата. Исходя из этого соображения, вычисленное значение  $a$  нужно увеличить, вероятно, до 0,12, тогда для хорошей пропитки потребовался бы вакуум порядка 5—10 mm.

Преимущества применения дегазированного пропитывающего состава становятся еще более очевидными, если вспомнить, что наилучшие условия для передачи тепла от стенок котла к высушиваемому кабелю создаются за счет конвекционных токов в воздушной прослойке, которые имеют место только в том случае, если давление газа в котле выше некоторого критического. За такое критическое давление, при котором передача тепла конвекцией практически сводится к нулю, можно принять давление порядка 50 mm. Следовательно, при давлении в котле ниже этого значения теплопередача от стенок котла к кабелю будет сильно затруднена, что повлечет удлинение процесса сушки. В случае же применения дегазированного компаунда возможно не слишком сильно углублять вакуум при сушке кабеля.

5. Образование пустот возможно и в хорошо пропитанном кабеле в процессе охлаждения кабеля до опрессования.

Вязкость маслоканифольного состава, как известно, сильно возрастает при понижении температуры, следовательно, увеличиваются силы, тормозящие перемещение массы в капиллярах и порах бумаги при охлаждении. Эта сила пропорциональна вязкости пропитывающего вещества и градиенту скорости относительного перемещения соседних слоев движущейся вязкой среды. Скорость перемещения пропитывающего вещества в изолирующим слое кабеля с вязкой пропиткой определяется в основном скоростью изменения его температуры, а следовательно, и объема, поэтому можно написать для радиальной скорости перемещения вязкого состава при изменении его температуры следующее уравнение:

$$V_r = -\beta k \frac{d\Theta}{dt} \left[ \frac{x}{2} - \frac{r^2}{2x} \right]. \quad (17)$$

В соединении с уравнением (10) получаем такое выражение для градиента давления:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\beta k \eta}{h} \cdot \frac{d\Theta}{dt} \left[ \frac{x}{2} - \frac{r^2}{2x} \right]. \quad (18)$$

Интегрируем это выражение и полагаем  $p = 0$  при  $x = r$ , тогда получим уравнение, из которого

можно найти величину внешнего давления на кабель, находящийся в пропитывающей массе, которое необходимо для обеспечения полноты пропитки при заданной скорости охлаждения:

$$p = \frac{\beta k \eta}{4 \cdot h} \cdot \frac{d\Theta}{dt} \left[ R^2 - r^2 - 2r^2 \ln \frac{R}{r} \right]. \quad (19)$$

Для заданной вязкости пропитывающего состава и скорости изменения температуры давление, определяемое из уравнения (19), достаточно, чтобы предупредить образование разрывов пропитывающего вещества в капиллярах и порах бумаги при охлаждении с заданной скоростью.

Все величины уравнения (19) можно легко определить за исключением произведения  $\eta \cdot \frac{d\Theta}{dt}$ .

Ввиду того что эти две величины связаны друг с другом (вязкость зависит от температуры), можно, построив отдельно зависимость вязкости  $\eta$  от температуры и зависимость скорости охлаждения от времени, взять затем произведение ординат обеих кривых и таким образом получить производную кривую  $\eta \cdot \frac{d\Theta}{dt}$ .

Зависимость скорости охлаждения от времени может быть найдена как первая производная от температуры кабеля, выраженной в зависимости от времени охлаждения. Подсчет можно значительно упростить, проведя его лишь для максимального значения  $\eta \cdot \frac{d\Theta}{dt}$ , как наиболее неблагоприятного с точки зрения образования пустот.

Таким же образом может быть решен вопрос о влиянии скорости охлаждения на полноту пропитки кабелей с вязкой пропиткой и установлен оптимальный режим охлаждения кабеля после пропитки.

6. Образование пустот при нагревании кабеля в эксплуатации связано с увеличением объема пропитывающего вещества и появлением давления на свинцовую оболочку. Если при этом предел упругости свинца будет превзойден, что может иметь место как при больших и кратковременных, так и при малых, но длительных нагрузках, то произойдет необратимое (неупругое) расширение свинцовой оболочки, и, следовательно, в кабеле появятся пустоты при последующем охлаждении кабеля.

Свинец обладает текучестью и следует более опасаться необратимых деформаций от длительного воздействия относительно малых нагрузок. Это соображение позволяет нам считать, что изменения объема пропитывающего состава в кабеле, вызывающие расширение свинцовой оболочки, скорее всего могут быть вызваны длительным перегревом кабеля, т. е. являются следствием нагревания в установившемся тепловом режиме.

Исходя из этого соображения, вычислим изменение объема пропитывающего состава при нагревании жилы кабеля в отношении окружающей среды  $\tau_c$  и логарифмическом поле в изолирующем слое кабеля [5].

Нагрев какого-либо кольцевого слоя радиуса  $x$

$$\tau_x = \tau_c - (\tau_c - \tau_s) \frac{\ln \frac{x}{r}}{\ln \frac{R}{r}},$$

где  $\tau_c = T_c - T_0$  и  $\tau_s = T_s - T_0$ .

Очевидно, что  $\tau_s = \tau_c \frac{S_0}{S_k + S_0}$   
и, следовательно,

$$\tau_x = \tau_c \left[ 1 - \frac{S_k}{S_k + S_0} - \frac{\ln \frac{x}{r}}{\ln \frac{R}{r}} \right]. \quad (20)$$

Увеличение объема элементарного кольца радиуса  $x$  при нагревании его на  $\tau_x$  получим, если обозначим отношение объемов пропитывающего вещества и изолирующего слоя через  $k$ , а тепловой коэффициент объемного расширения через  $\beta$ , из следующего уравнения:

$$d v = \beta 2\pi x d x k \tau_x.$$

Подставив сюда значение  $\tau_x$  из (20), получим:

$$d v = 2\pi k \beta \left\{ x \tau_c d x \left[ 1 - \frac{S_k}{S_k + S_0} \cdot \frac{\ln \frac{x}{r}}{\ln \frac{R}{r}} \right] \right\}. \quad (21)$$

Если ввести для упрощения следующее обозначение:

$$B = \tau_c \frac{S_k}{S_k + S_0} \cdot \frac{1}{\ln \frac{R}{r}},$$

то

$$d v = \pi k \beta \{ [ \tau_c + B \ln r ] 2x d x - B 2x \ln x d x \}.$$

Проинтегрировав это выражение в пределах  $x$  от  $r$  до  $R$ , получим окончательное уравнение для вычисления увеличения объема пропитывающего состава в одножильном кабеле при нагревании жилы на  $\tau_c$ :

$$\Delta V = \pi k \beta \left\{ (R^2 - r^2) \cdot \left[ \tau_c + B \left( \ln r + \frac{1}{2} \right) \right] - B (R^2 \ln R - r^2 \ln r) \right\}. \quad (22)$$

Предполагая отсутствие упругости, — изменения необратимы, — приращение радиуса свинцовой оболочки можно получить из следующего уравнения:

$$\delta_r^2 + 2R\delta_r - \frac{\Delta V}{\pi} = 0.$$

Решение этого уравнения будет:

$$\delta_r = -R + \sqrt{R^2 + \frac{\Delta V}{\pi}}. \quad (23)$$

В виде примера вычислим приращение радиуса свинцовой оболочки жилы 35-кВ кабеля с радиусом жилы  $r = 0,7$  см и  $R = 1,6$  см. Принимая  $\beta = 0,0007$ ,  $\sigma_k = 550 \text{ t}\cdot\Omega$ ;  $\sigma_0 = 120 \text{ t}\cdot\Omega$ , при наружном диаметре кабеля  $D = 4,5$  см и глубине прокладки кабеля  $L = 70$  см, получим:

$$S_k = \frac{550}{2\pi} \ln \frac{1,6}{0,7} = 72,5 \text{ t}\cdot\Omega; \quad S_0 = \frac{120}{2\pi} \ln \frac{4,70}{4,5} = 79 \text{ t}\cdot\Omega.$$

Следовательно,  $B = 0,58 \cdot \tau_c$ , тогда  $\frac{\Delta V}{\pi} = 0,0058 \cdot \tau_c$ . При  $\tau_c = 80^\circ \text{ С}$  (аварийный нагрев) получим  $\Delta V = 0,145 \text{ см}^3$  и следовательно,  $\delta_r = 0,1 \text{ мм}$ .

Увеличение объема пропитывающего состава на  $\Delta V = 0,145 \text{ см}^3$  при охлаждении кабеля поведет к образованию пустот. Увеличение объема пустот составит

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{0,145 \cdot 2 \cdot 100}{(1,6^2 - 0,7^2)} = 4,5\%.$$

#### Литература

1. G. B. Schanklin. Low gas-pressure cable. El. Eng. стр. 307, т. 58, 1939.
2. Davis and Eddy, High-voltage cable development. JAIEE, стр. 52, 1929.
3. Л. Эмануэли. Кабели высокого напряжения (перевод), 1932.
4. H. Race. Test on oil-impregnated paper. El. Eng., стр. 573, 1938.
5. С. М. Брагин. Тепловой расчет электрических кабелей. ОНТИ, 1937.

(Краткие сообщения)

## Новый импульсный генератор на 8,4 млн. вольт

На рис. 1 представлен общий вид импульсного генератора Харьковского электротехнического института, развивающего максимальное напряжение 8,4 млн. В. Энергия разряда составляет 160 kWsec. Емкость конденсаторов генератора — 0,0132 мкФ.

Импульсный генератор установлен в полевой лаборатории ХЭТИ на открытом воздухе и предназначен для исследования вопросов грозоустойчивости электрических сетей, разрабатываемых ХЭТИ по заданиям Донэнерго и ДнепроЭнерго.

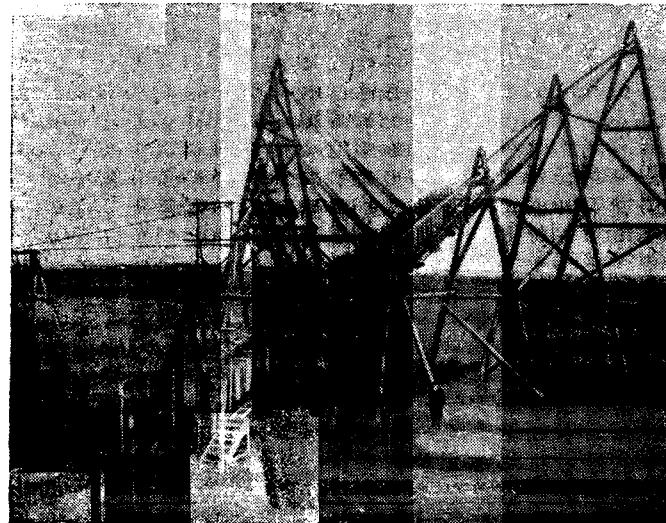


Рис. 1. Импульсный генератор ХЭТИ на 8,4 млн. В

С помощью импульсного генератора будут изучаться волновые характеристики линий электропередач, импульсные характеристики заземлителей, схемы защиты подстанций и т. п. Новый импульсный генератор ХЭТИ уже сдан в опытную эксплуатацию и является одним из самых больших в мире как по величине напряжения, так и по энергии разряда.

## Новый метод определения сопротивления обратной последовательности синхронных генераторов

Инж. И. А. СЫРОМЯТНИКОВ  
Наркомат электростанций СССР

Для синхронных генераторов сопротивление обратной последовательности можно определить из опыта установившегося несимметричного к. з. Для этого необходимо иметь два известных сопротивления, которые подключаются к генератору по схеме рис. 1. Такое соединение осуществляется крайне просто, если генератор нормально работает на группу из трех однофазных трансформаторов. При этом в зависимости от схемы соединения группы трансформаторов могут быть применены две схемы. Схема *a* рис. 2 дана для случая, когда нормальное соединение группы  $\Delta/\Delta$  и схема *b* для соединения по схеме  $\Delta/\lambda$ . Большинство трансформаторов имеет нормальную схему соединения обмоток  $\Delta/\lambda$  и для них чрезвычайно просто может быть осуществлена схема *b*.

При опыте производится измерение тока генератора обязательно для всех трех фаз. Зная активное и реактивное сопротивления трансформатора по данным опыта, находим активное и реактивное сопротивления обратной последовательности генератора.

Измерение следует производить для нескольких значений токов статора, при этом ток в наиболее нагруженной фазе можно повышать до 60—70% номинального тока.

Описанный метод разработан автором в 1938 г. и применен при испытании генераторов в Азэнерго.

**Вывод основной формулы.** Из рассмотренной схемы соединения, представленной на рис. 1, следует, что в одной фазе сопротивление получается меньше, чем в двух других. Это обстоятельство позволяет применить следующий простой прием. Можно представить, что одно из сопротивлений закорочено, а это, как известно, соответствует однофазному к. з. Расчетная схема для этого случая представлена на рис. 3.

Токи прямой и обратной последовательностей генератора для фазы *A*:

$$i_{A1} = i_1 = \frac{\dot{U}}{\dot{Z}_1 + \frac{\dot{Z}_{Tp}(2\dot{Z}_2 + \dot{Z}_{Tp})}{3\dot{Z}_2 + 2\dot{Z}_{Tp}}}, \quad (1)$$

$$i_{A2} = i_1 \frac{\dot{Z}_{Tp}}{3\dot{Z}_2 + 2\dot{Z}_{Tp}}; \quad (2)$$

токи в отдельных фазах генератора

$$i_A = i_{A1} + i_{A2} = i_1 \left( 1 + \frac{\dot{Z}_{Tp}}{3\dot{Z}_2 + 2\dot{Z}_{Tp}} \right), \quad (3)$$

$$i_B = i_{A1}a^2 + i_{A2}a = i_1 \left( a^2 + \frac{a\dot{Z}_{Tp}}{3\dot{Z}_2 + 2\dot{Z}_{Tp}} \right), \quad (4)$$

$$i_C = i_{A1}a + i_{A2}a^2 = i_1 \left( a + \frac{a^2\dot{Z}_{Tp}}{3\dot{Z}_2 + 2\dot{Z}_{Tp}} \right). \quad (5)$$

Заменяя  $a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$  и  $a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ ,

получим:

$$\frac{i_B}{i_A} = \frac{-3 - j\sqrt{3} \left( 1 + \frac{2\dot{Z}_2}{\dot{Z}_2 + \dot{Z}_{Tp}} \right)}{6}, \quad (6)$$

$$\frac{i_C}{i_A} = \frac{-3 + j\sqrt{3} \left( 1 + \frac{2\dot{Z}_2}{\dot{Z}_2 + \dot{Z}_{Tp}} \right)}{6}. \quad (7)$$

$$\frac{2\dot{Z}_2}{\dot{Z}_2 + \dot{Z}_{Tp}} = \alpha + j\beta, \quad (8)$$

где

$$\alpha = 2 \frac{R_2(R_2 + R_{Tp}) + x_2(x_2 + x_{Tp})}{(R_2 + R_{Tp})^2 + (x_2 + x_{Tp})^2}. \quad (9)$$

$$\beta = 2 \frac{R_2x_{Tp} - x_2R_{Tp}}{(R_2 + R_{Tp})^2 + (x_2 + x_{Tp})^2}. \quad (10)$$

Подставляя значения  $\alpha$  и  $\beta$  в (6) и (7), находим отношение абсолютных значений токов

$$\frac{i_B}{i_A} = \sqrt{\frac{(\sqrt{3} - \beta)^2 + (1 + \alpha)^2}{12}}, \quad (11)$$

$$\frac{i_C}{i_A} = \sqrt{\frac{(\sqrt{3} + \beta)^2 + (1 + \alpha)^2}{12}}. \quad (12)$$

Из уравнений (11) и (12) следует, что только при  $\beta = 0$  токи в фазах *B* и *C* равны по абсолютной величине. Для соблюдения этого условия необходимо, чтобы сопротивления  $Z_2$  и  $Z_{Tp}$  были однородны. Из уравнения (10) следует, что при  $\beta = 0$

$$\frac{R_2}{x_2} = \frac{R_{Tp}}{x_{Tp}}.$$

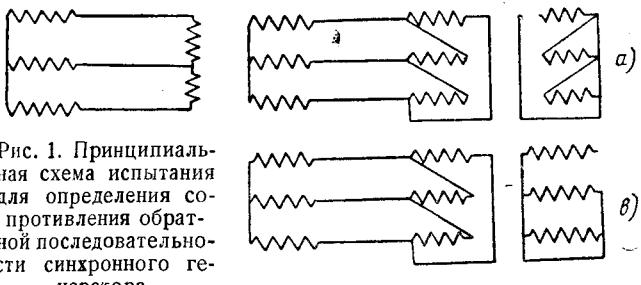


Рис. 1. Принципиальная схема испытания для определения сопротивления обратной последовательности синхронного генератора

а — практическая схема испытания для трансформатора, соединенного нормально по схеме  $\Delta/\Delta$ ; б — то же для трансформатора по схеме  $\Delta/Y$ .

Рис. 2

Из уравнений (3) и (4) находим, что при  $\beta = 0$ :

$$Z_2 = Z_{Tp} \frac{\sqrt{12 \frac{I_B^2}{I_A^2} - 3} - 1}{3 - \sqrt{12 \frac{I_B^2}{I_A^2} - 3}}. \quad (13)$$

В случае, когда сопротивления  $Z_2$  и  $Z_{Tp}$  неоднородны, зная токи по отдельным фазам, можно из уравнений (11) и (12) определить  $\alpha$  и  $\beta$ :

$$\beta = \sqrt{3} \left( \frac{I_C^2}{I_A^2} - \frac{I_B^2}{I_A^2} \right), \quad (14)$$

$$\alpha = \sqrt{12 \frac{I_B^2}{I_A^2} - (\sqrt{3} - \beta)^2} - 1. \quad (15)$$

Из уравнения (8) находим:

$$\dot{Z}_2 = \dot{Z}_{Tp} \frac{\alpha + j\beta}{2 - \alpha - j\beta}. \quad (16)$$

Для определения сопротивления обратной последовательности генератора можно применить следующий простой способ, дающий достаточную точность.

Определяем среднее значение

$$\frac{I_A}{I_{BC}} = 0,5 \left( \frac{I_A}{I_A} + \frac{I_A}{I_C} \right) \quad (17)$$

и из уравнения (13) находим сопротивление обратной последовательности генератора.

Для удобства расчетов в таблице приведены значения  $\frac{Z_2}{Z_{Tp}}$  в зависимости от отношения  $\frac{I_A}{I_{BC}}$ .

| $\frac{I_A}{I_{BC}}$ | 1,38  | 1,39  | 1,40  | 1,41  | 1,42  | 1,43  | 1,44  | 1,45  |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\frac{Z_2}{Z_{Tp}}$ | 0,693 | 0,660 | 0,625 | 0,586 | 0,562 | 0,527 | 0,503 | 0,470 |

Трансформаторы по схеме рис. 2 соединены открытым треугольником. При этом соединении сопротивление трансформатора

$$Z_{Tp} = \frac{e_k U_n^2}{P}, \quad (18)$$

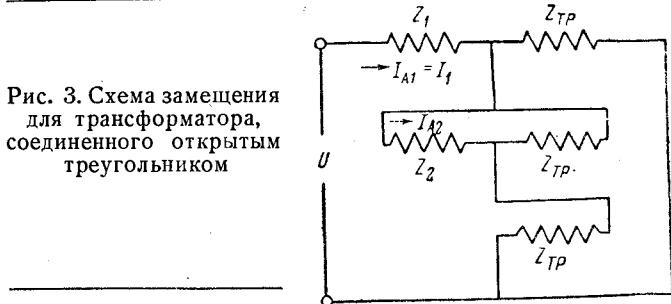
где  $P$  — номинальная мощность одной фазы в MVA,  
 $U_n$  — номинальное линейное напряжение в kV.

Из формулы видно, что сопротивление трансформатора при соединении открытым треугольником увеличивается в три раза против нормального. Это весьма важное обстоятельство необходимо учитывать при расчетах.

Пример. Генератор 32 000 kVA, 25 600 kW, 6,3 kV, 2930 A; трансформатор  $3 \times 10$  000 kVA, 6,3/21,9 kV, 2750/792 A,  $e_k = 10,1\%$ , сопротивление трансформатора, отнесенное к мощности генератора,  $Z_{Tp} = 32,4\%$ .

Из опыта к. з. генератора при работе на трансформатор, соединенный открытым треугольником, определено отноше-

Рис. 3. Схема замещения для трансформатора, соединенного открытым треугольником



ние токов  $\frac{I_A}{I_B} = 1,45$ , полученное как среднее из четырех опытов.

Из формулы (13) находим  $Z_2 = 15,3\%$ .

Преимущество нового метода определения сопротивления обратной последовательности — его простота. Интересно отметить, что, зная только токи по трем фазам генератора, можно определить как реактивное, так и активное сопротивления обратной последовательности.

Недостаток нового метода тот, что его не всегда можно применять из-за отсутствия группы трансформаторов в том случае, когда станция имеет только генераторное напряжение или при работе генератора на трехфазный трансформатор.

## О переходных процессах в машинах постоянного тока

Д-р техн. наук, проф. Е. В. НИТУСОВ  
Московский энергетический институт им. Молотова

Теория переходных процессов в синхронных машинах получила значительное развитие благодаря работам американских авторов (Park, Linville, Daherty and Nickle и др.), использовавших методы операторного исчисления и понятие о переходных реактивностях. В машинах постоянного тока мы встречаемся с некоторыми дополнительными обстоятельствами, иногда значительно усложняющими анализ.

К особенностям машин постоянного тока, как известно, относятся:

1) наличие коллектора и связанный с ним возможность различных, иногда сложных, схем самовозбуждения;

2) наличие больших сплошных железных частей в магнитной цепи машины, в которых могут возникать значительные вихревые токи с большим коэффициентом времени; подобную же роль играют короткозамкнутые щетками секции обмотки якоря;

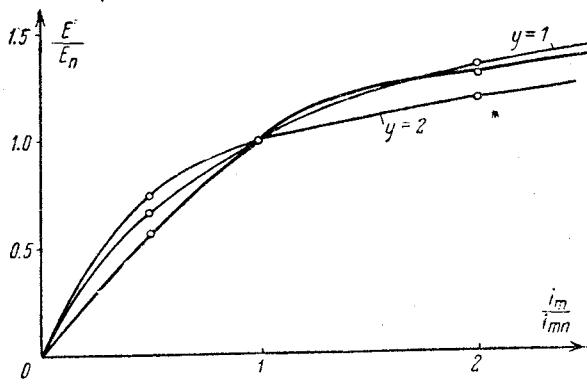


Рис. 1. Характеристика холостого хода по уравнению  $E = E_n \frac{1 + y}{i_{mn} + y i_m} i_m$

3) необходимость учесть магнитное насыщение в генераторах с самовозбуждением; лишь благодаря насыщению заканчивается процесс самовозбуждения и в соответствующих уравнениях отпадает неопределенность.

При изыскании функции  $E = f(i_m)$ , которая представляла бы удобства для математических операций и в то же время более соответствовала бы характеристике намагничивания машин постоянного тока с большим воздушным зазором,

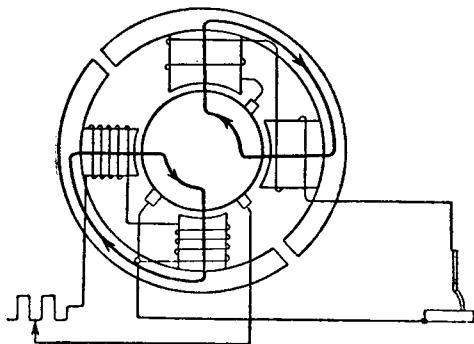


Рис. 2. Машина с разделенными магнитными цепями для шунтового возбуждения и для противокомпаундной обмотки

автор, независимо от Dahl<sup>1</sup>, пришел к заключению, что наиболее подходящим является уравнение Фрелиха (Frölich)

$$E = \Delta E_0 + E_n \frac{1+y}{i_n + y i_m}.$$

Здесь  $E_n$  — э. д. с., лежащая на „колене“ характеристики холостого хода вблизи номинальной э. д. с.;  $i_n$  — ток возбуждения, соответствующий  $E_n$ ;  $y$  (так же, как и  $E_n$ ) подбирается по данной характеристике и практически лежит в пределах  $1 \div 2$  (рис. 1).

Дополнительное усложнение в анализ вносит вопрос об изменениях индуктивностей в связи с магнитным насыщением. В машинах постоянного тока с большим воздушным зазором процессы имеют апериодический характер. Автор, учитывая это обстоятельство в отличие от методов, применяемых в настоящее время при исследовании нелинейных колебаний (однако, в соответствии с общей теорией дифференциальных уравнений с переменными параметрами), считает возможным брать при составлении исходных уравнений средние значения индуктивностей в заданных пределах.

В отдельных более простых математических случаях может быть использовано и для индуктивности то же уравнение Фрелиха:

$$L = \frac{L_0}{i_n} \left( \frac{i_n}{i_n + y i_m} \right)^2; \quad L_0 = w \left( \frac{d\Phi}{di_m} \right)_{i_m=0}.$$

При анализе решения линейного дифференциального уравнения:

$$a \frac{d^2i}{dt^2} + b \frac{di}{dt} + c = 0$$

для апериодического переходного процесса было найдено, что члены порядка высшего, чем первый, играют существенную роль лишь для времени от 0 до  $t = 2 \frac{a}{b}$ .

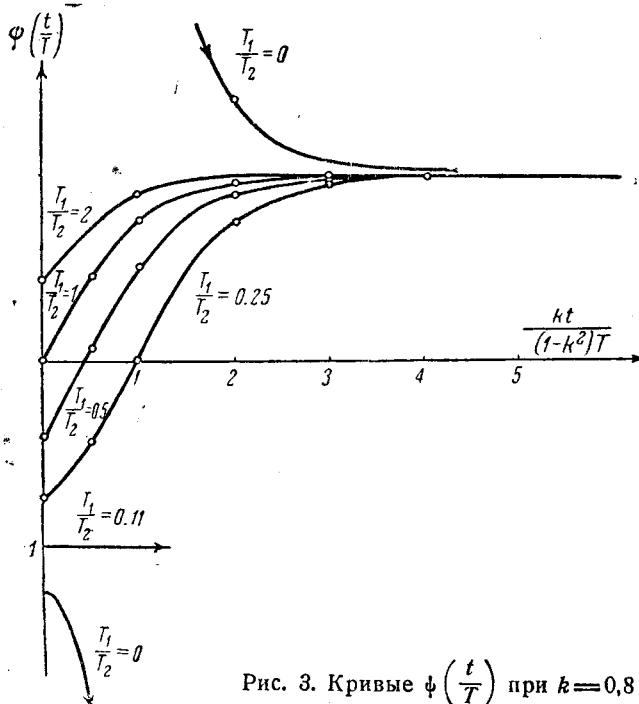


Рис. 3. Кривые  $\phi \left( \frac{t}{T} \right)$  при  $k=0,8$

На дальнейшее течение процесса оказывает почти исключительное влияние лишь член, содержащий первую производную.

В соответствии с этим следует различать три стадии переходного процесса:

1) начальная стадия, которая в цепях с взаимоиндуктивностью определяется, главным образом, индуктивностями рассеяния, представляющими собой самостоятельные энергетические системы;

2) основная стадия, начинающаяся приближительно по истечении времени  $t = 2 \frac{a}{b}$  и определяемая потоками взаимоиндукции;

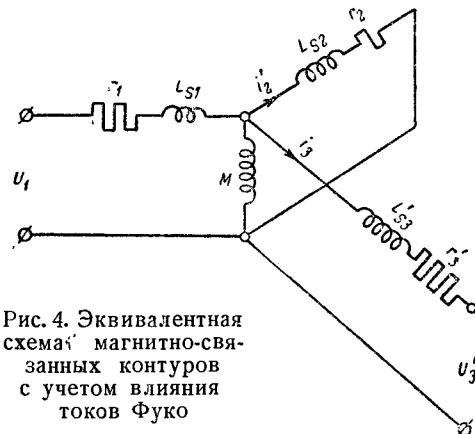


Рис. 4. Эквивалентная схема магнитно-связанных контуров с учетом влияния токов Фуко

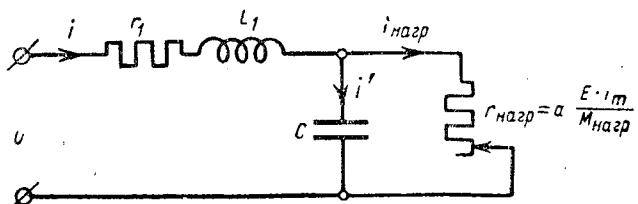


Рис. 5. Эквивалентная схема двигателя независимого возбуждения

3) стадия установившегося режима. Поэтому следует различать три фактора электрической устойчивости машин:

$$\left( \frac{dI}{du} \right)_{magn}, \quad \left( \frac{dI}{du} \right)_{nep} \text{ и } \left( \frac{dI}{du} \right)_{ust}$$

или обратные им величины для одиночных генераторов. Автор проанализировал переходные процессы в машинах — последовательного возбуждения без учета влияния токов Фуко и при учете его, компаундного возбуждения, шунтового и независимого возбуждения и в машинах с поперечным полем. Было найдено, что в отношении первого фактора

$\left[ \left( \frac{dI}{du} \right)_{magn} \right]$  наиболее устойчивы машины последовательного возбуждения при малом насыщении и при отсутствии влияния токов Фуко и одиночные генераторы поперечного поля:

в отношении второго фактора  $\left[ \left( \frac{dI}{du} \right)_{nep} \right]$  наиболее устойчив одиночный генератор компаундного возбуждения с разделенными магнитными цепями для шунтового и последовательного возбуждений (рис. 2) и двигатели последовательного возбуждения; в отношении статической устойчивости — одиночный генератор независимого возбуждения и двигатель последовательного возбуждения.

Для количественной оценки электрической устойчивости машин постоянного тока автор вводит понятие об операторных сопротивлениях:

$$p_n = b \frac{di}{dt} : i \text{ и } p_s = a \frac{d^2i}{dt^2} : i.$$

Эти сопротивления были определены для свободного тока в цепи с индуктивностью  $L$ , емкостью  $C$  и активным сопро-

<sup>1</sup> Dahl. Electric circuits, vol. 2, 1939.

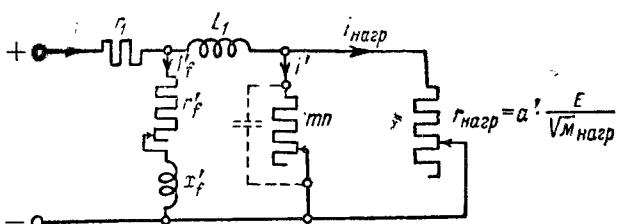


Рис. 6. Эквивалентная схема двигателя последовательного возбуждения с учетом влияния токов Фуко

тивлением  $r$ :

$$v_t = L \frac{di}{dt}; i = -\frac{r}{2} + L \beta \operatorname{ctg} \beta t;$$

$$v_C = \frac{1}{C} \int idt; i = -\frac{r}{2} - L \beta \operatorname{ctg} \beta t,$$

где

$$\beta = \frac{1}{2a} \sqrt{b^2 - 4ac}.$$

Для свободного тока в двухобмоточном трансформаторе: в первичной цепи

$$p_{m_1} = -\frac{r_1}{2} \frac{T_1 + T_2}{(1 - k^2)T} \left[ 1 - k \phi \left( \frac{t}{T} \right) \right],$$

$$p_{s_1} = -r_1 + \frac{r_1}{2} \frac{T_1 + T_2}{(1 - k^2)T} \left[ 1 - k \phi \left( \frac{t}{T} \right) \right];$$

во вторичной цепи

$$p_{m_2} = -\frac{r_2}{2} \frac{T_1 + T_2}{(1 - k^2)T} \left[ 1 - k \operatorname{ctg} \frac{kt}{2(1 - k^2)T} \right],$$

$$p_{s_2} = -r_2 + \frac{r_2}{2} \frac{T_1 + T_2}{(1 - k^2)T} \left[ 1 - k \operatorname{ctg} \frac{kt}{2(1 - k^2)T} \right].$$

Здесь  $T_1$  и  $T_2$  — коэффициенты времени первичной и вторичной цепей;

$T = \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2}$  — некоторый совместный коэффициент времени;

$k$  — коэффициент магнитной связи. Функция  $\phi \left( \frac{t}{T} \right)$

представлена на рис. 3.

Для двигателя компаундного возбуждения

$$p_m = -p_s = -R \frac{T_1 + T_2}{(1 - k^2)T} (1 + kk_0 T)^2,$$

где

$$R = r_1 + k_a M_0; M_0 = \frac{E}{i_m - k_a i_1}; k_a = \frac{w_s}{w_m};$$

$$k_0 = \frac{M_0}{\sqrt{L_1 - L_2}}; T_1 = \frac{L_1}{R}; T_2 = \frac{L_2}{r_m}$$

(индекс 1 относится к цепи якоря, индекс 2 — к цепи шунтового возбуждения).

Сравнивая одиночные генераторы независимого и шунтового возбуждений, можно установить, что в условиях шунтового возбуждения последовательные обмотки возбуждения утрачивают свою роль активного сопротивления.

Токи Фуко образуют самостоятельные поля (в особенности в железных частях магнитной цепи, находящихся вне обмоток, например в ярме) и, следовательно, представляют собой систему с коэффициентом магнитной связи, меньшим единицы.

На рис. 4—7 приводим эквивалентные схемы для двух и трех магнитно связанных контуров (рис. 4), двигателя с неизменным и последовательным возбуждением (рис. 5 и 6) и для метадина по крестообразной схеме (рис. 7). Пользуясь этими схемами, легко найти условия возникновения колебательных процессов в двигателях и метадинах. Емкости соответствуют запасам кинетической энергии вращающихся частей машин. Уравнение Фрелиха позволило вывести уравнение для процесса самовозбуждения генераторов шунтового возбуждения при холостом ходе (рис. 8):

$$\frac{i_m}{i_n} \approx \frac{1 - e^{-\frac{r_m}{L_2} t}}{1 + y \frac{E_n}{\Delta E_0} \cdot e^{-\frac{r_m}{L_2} t}}$$

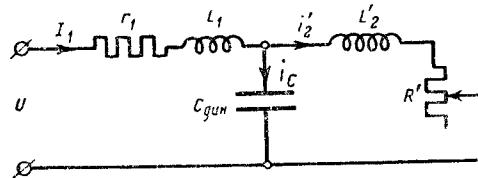


Рис. 7. Упрощенная эквивалентная схема метадина по крестообразной схеме

и для электрического торможения машины последовательного возбуждения:

$$\frac{m^2 t}{yrc'} = \left( \frac{i_n}{i} - 1 \right) + y \ln \frac{i_n}{i},$$

где

$$m = \frac{E_n (1 + y)}{n}, \quad c' = \frac{1}{b} \cdot \frac{2\pi}{60} J;$$

$J$  — момент инерции.

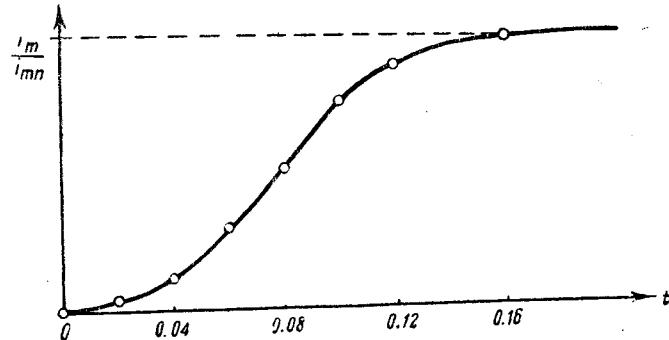


Рис. 8. Кривая самовозбуждения, построенная по урав-

$$\text{нению: } \frac{i_m}{i_n} \approx \frac{1 - e^{-\frac{r_m}{L_2} t}}{1 + \frac{yE}{\Delta E_0} e^{-\frac{r_m}{L_2} t}}$$

## Ступенчатые потенциометры для поверки стрелочных приборов

Д-р. техн. наук, проф. А. Д. НЕСТЕРЕНКО  
Киевский завод электроаппаратуры

Градуировку и поверку точных стрелочных электроизмерительных приборов в процессе производства или при периодическом контроле в эксплуатации обычно выполняют при помощи потенциометров постоянного тока. При пользовании потенциометрами распространенных типов для получения любого отсчета нужно манипулировать нескользкими рукожопками, причем для каждого почти случая приходится пользоваться отличными коэффициентами. При поверке ваттметров, кроме того, приходится производить измерения в двух цепях (тока и напряжения). Все это не только усложняет работу, но может явиться и источником ошибок. Поэтому при массовых градуировках и поверках, когда экономия в манипуляциях и повышение надежности работы имеет большое значение, применение таких потенциометров не является желательным.

Эффективное решение дают ступенчатые потенциометры, специально предназначенные для поверки приборов.

Ступенчатый потенциометр представляет собою потенциометр упрощенного типа, дающий возможность установки и измерения только небольшого количества значений напряжения, находящихся в определенном отношении между собою. Принципиальная схема такого устройства приведена на рис. 1. Рабочая часть потенциометра имеет только один переключатель  $A$ , который позволяет получать на зажимах  $BC$  скачками  $\frac{1}{n}, \frac{2}{n}, \frac{3}{n}, \dots, \frac{n}{n}$  части общего напряжения  $U$ . Если ток  $I$  в цепи потенциометра установить при помощи нормального элемента  $E_0$  такой величины, чтобы падение напряжения  $U$  соответствовало максимальному

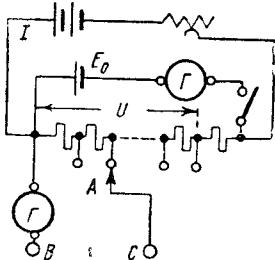


Рис. 1

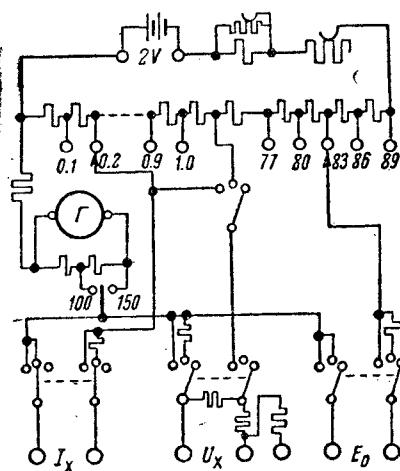


Рис. 3

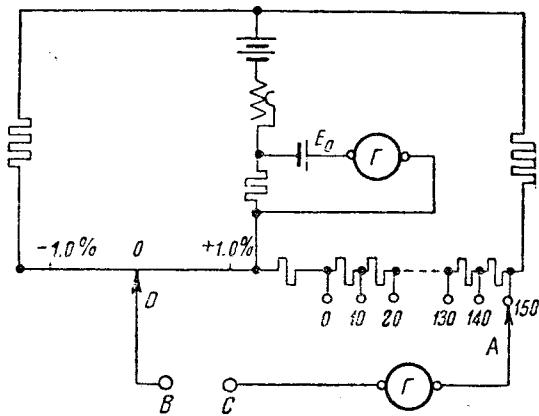


Рис. 2

отклонению поверяемого прибора, то положения переключателя  $A$  будут соответствовать промежуточным значениям шкалы этого прибора.

При градуировке приборов отдельные точки наносятся в следующем порядке: рычаг потенциометра устанавливаются на соответствующую точку, затем, изменяя ток в цепи градуируемого прибора до равновесия схемы, отмечают на шкале отклонение прибора. При поверке прибора погрешности показаний в данной точке определяются либо компенсацией схемы на определенных положениях рычага переключателя потенциометра и отсчетом отклонения указателя от соответствующего деления на шкале, либо установкой указателя прибора на заданном делении и отсчете погрешности на потенциометре одним из методов, указанных ниже.

На рис. 2 представлена схема подобного потенциометра, предложенная Н. Н. Пономаревым [3]. Схема рассчитана на номинальное напряжение 45 и 60 мВ для шкалы с числом делений 150. Переключатель имеет 15 положений для градуировки шкалы на каждом десятом делении. Схема отличается тем, что при поверке прибора изменением тока в цепи прибора указатель его устанавливается точно на заданное деление, и уравновешивание схемы достигается при помощи добавочного делителя  $D$  в виде струны со шкалой, отградуированной непосредственно в процентах (от 0 до  $\pm 1,0\%$ ).

Схема такого же потенциометра, разработанная Р. Шмидтом [4] в исполнении фирмы Сименс и Гальске, представлена на рис. 3. Этот потенциометр рассчитан на поверку в 10 точках и отличается тем, что определение погрешности при поверке приборов осуществляется по остаточному отклонению гальванометра. Номинальное напряжение потенциометра равно 0,3 В. Тот же потенциометр в исполнении фирмы Гартманн и Браун имеет номинальное напряжение 0,5 В и по схеме своей лишь незначительно отличается от схемы рис. 3. Потенциометр по схеме Р. Шмидта является наиболее приспособленным для массовой градуировки и поверки стрелочных приборов.

Упомянутые выше ступенчатые потенциометры отличаются, однако, тем недостатком, что рассчитаны только на определенное число поверяемых точек (в первом типе — 15 и во втором — 10). Между тем из соображений получения удобной для пользования постоянной прибора числа делений шкалы приходится устанавливать различными (от 100 до 150). И в случае, когда число делений шкалы не является кратным числу положений рабочего рычага потенциометра, градуировку и поверку приходится производить не по основным точкам,

кратным 10 или 5, а по промежуточным. Это востребование требует вспомогательных вычислений и внимания во время градуировки приборов и может служить источником добавочных погрешностей при черчении шкал.

Поэтому при разработке градуировочных установок для производства электромизерительной аппаратуры нам пришлось остановиться на схеме, несколько отличной от предыдущих. Схема эта (рис. 4) имеет рабочий переключатель  $A$  с 30 контактами, позволяющий градуировку и проверку приборов через каждые пять делений шкалы с числом делений до 150. Увеличение числа поверяемых точек вызвано необходимостью повысить точность градуировки амперметров и вольтметров с неравномерной шкалой. Потенциометр дает возможность градуировать и проверять приборы с номинальным числом делений шкалы, равным 100, 110, 120, 125, 130 и 150. Это достигается тем, что номинальное напряжение 0,5 В может быть установлено не только на сопротивлении  $OL$ , но и на части его, соответствующей числу делений данной шкалы. Осуществляется это изменением рабочего тока в цепи потенциометра при помощи переключателя  $M$ , позволяющего изменять точку подсоединения цепи нормального элемента.

При определении погрешностей поверяемых приборов используется метод остаточного отклонения гальванометра. Для градуировки гальванометра непосредственно в величинах погрешностей (в процентах) необходимо обеспечить постоянство сопротивления его цепи при любом положении переключателя  $A$ , что и достигается соответствующим подбором сопротивлений  $R_1$ ,  $R_2$ . Оптимальные условия работы гальванометра достигаются подбором сопротивлений  $R_{01}$  и  $R_{02}$ . Эти сопротивления монтируются вне аппарата для возможности быстрой наладки схемы в случае повреждения гальванометра и замены его другим с иными характеристиками.

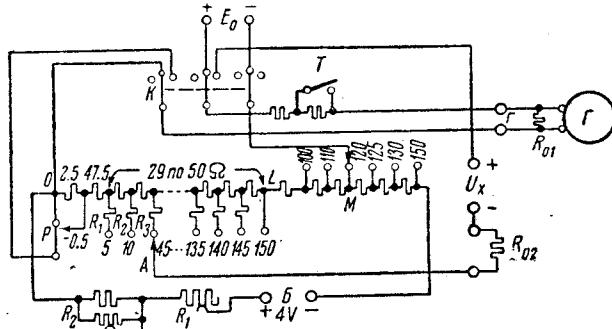


Рис. 4

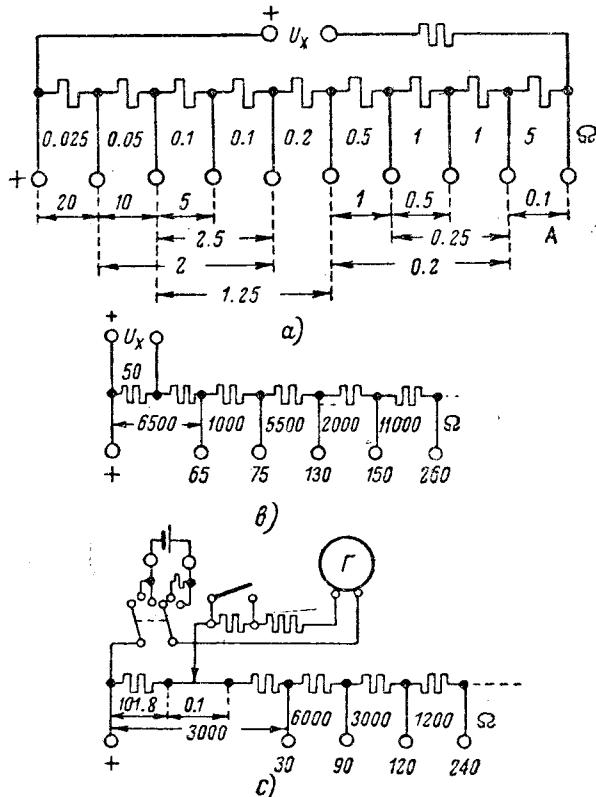


Рис. 5

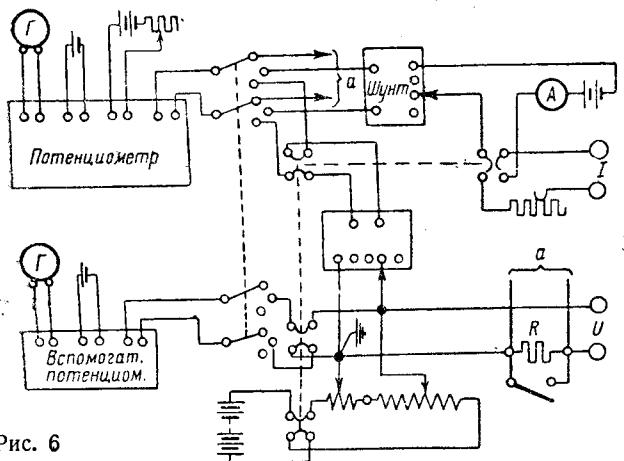


Рис. 6

Для удобной проверки точности показаний гальванометра предназначается переключатель  $P$ . Перевод его в положение, обозначенное «—0,5», при уравновешенной схеме должен вызвать отклонение гальванометра, соответствующее 0,5 деления шкалы. Для предупреждения возможных ошибок благодаря неверному положению переключателя  $P$  во время проверки приборов, этот переключатель в положении, соответствующем проверке схемы, не фиксируется и под действием пружины стремится возвратиться в нормальное рабочее положение.

В схеме не предусмотрена возможность внесения коррекции на температурный коэффициент э. д. с. нормального элемента, так как поверка и градуировка приборов должна производиться при температуре, близкой к  $20^{\circ}\text{C}$ . Отклонения э. д. с. различных элементов от принятой при расчете схемы (1,0183), а также изменений э. д. с. в пределах максимально допустимых колебаний температуры ( $\pm 5^{\circ}$ ) не превышают величины  $\pm 0,03\%$ , чем можно пренебречь при поверке приборов класса 0,2. В случае необходимости внесение указанных поправок может быть осуществлено путем подсоединения цепи нормального элемента в точке О при помощи предусмотренного для этого добавочного переключателя.

Установка тока в цепи амперметров, а также в последовательной цепи ваттметров при помощи данного потенциометра достигается при помощи универсального шунта (рис. 5, а) с номинальным напряжением, равным номинальному напряжению потенциометра (0,5 V).

Для градуировки и поверки вольтметров служит делитель напряжения (b, рис. 5) имеющий ответвление, на котором устанавливается напряжение, равное 0,5 V, если между общим зажимом (+) и соответствующим зажимом приложено номинальное напряжение.

Для установки напряжения в параллельной цепи ваттметров предназначается вспомогательный потенциометр (c, рис. 5) с самостоятельным гальванометром и нормальным элементом.

На рис. 6 представлена полная схема универсальной установки, предназначенной для поверки амперметров, вольтметров и ваттметров. В схему, кроме описанных выше элементов, введено также сопротивление  $R = 16,67 \Omega$  для измерения тока в параллельной цепи ваттметров.

### Литература

1. А. А. Кейм. Метрология и поверочное дело, стр. 43, № 2—3, 1939.
2. Н. И. Тюрина. Метрология и поверочное дело, стр. 15, № 9, 1939.
3. Н. Н. Пономарев. Информационно-технический бюллетень ОЛИЗ, октябрь, стр. 42, № 1, 1935.
4. АТМ, стр. 931—5, май 1935.

## Нагрев трансформаторов прямыми лучами солнца на открытых подстанциях<sup>1</sup>

Канд. техн. наук, доц. Д. Г. ТУМАНИШВИЛИ  
Тбилиси

Тема работы связана с вопросом использования трансформаторов, не сходящим со страниц печати, и представляет поэтому некоторый интерес. Опыты проводились автором в южных широтах, где температура воздуха часто значитель-

<sup>1</sup> Статья является кратким изложением кандидатской диссертации автора на ту же тему.

но превышает стандартную  $35^{\circ}\text{C}$ , и явление нагрева трансформаторов лучами солнца проявляется более резко.

Солнечная радиация сильно зависит от ряда физических факторов — высоты стояния солнца, содержания пыли и влаги в атмосфере, рассеянности света и прочее. Однако степень облучения поверхности, перпендикулярной лучам, если пренебречь влиянием атмосферной оболочки, можно считать в любых широтах одинаковой.

Обогрев радиацией любым образом расположенной поверхности

$$q = q_n \cdot \cos \Theta, \left[ \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \text{min}} \right], \quad (1)$$

где  $q_n$  — облучение нормальной лучам поверхности.

$\cos \Theta$  определяется сравнительно сложным выражением. Для случая трансформаторов его можно упростить, если принять во внимание, что трансформаторы ограничены лишь вертикальными и горизонтальными поверхностями. Кроме того, можно считать, что вертикальные плоскости бака определенным образом ориентированы в отношении стран света. Тогда для расчета можно использовать готовые таблицы, в которых помещены значения  $\cos \Theta$  для вертикальных поверхностей, ориентированных по разным странам света: с, ю, з, в, сз, св, юв и юз. Такие таблицы имеются, например, в работе Разумова И. К.<sup>2</sup>

В этой же работе можно найти значения  $q_n$  для разных широт в зависимости от времени суток.

Уравнение нагревания трансформаторов, установленных на открытых подстанциях и подвергающихся дополнительному нагреву солнечными лучами, имеет вид:

$$\tau = \frac{Q_h + Q_c}{A} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) = \frac{Q_h}{A} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + \frac{Q_c}{A} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) = \tau_h + \tau_c, \quad (2)$$

где  $Q_h$  — количество тепла, выделяющееся в единицу времени в трансформаторе при его нагрузке;  $Q_c$  — количество тепла, передаваемое трансформатору в единицу времени за счет радиации;  $\tau_h$  и  $\tau_c$  — превышения температуры, обусловленные теплом  $Q_h$  и  $Q_c$ , соответственно;  $A$  — теплоотдача;  $T$  — постоянная времени нагрева.

Как показывает выражение (2), действие каждого теплового фактора  $Q_h$  и  $Q_c$  можно изучать самостоятельно.

При постоянстве нагрузки трансформатора определение величины  $\tau_h$  не представляет больших трудностей. Аналитическое же определение  $\tau_c$ , ввиду непрерывного изменения во времени величины  $Q_c$ , весьма затруднительно.

Можно пойти на упрощение, как видно из дальнейшего, вполне оправданное, и подсчитывать количество тепла, принимая для одного часа  $\cos \Theta$  и  $q_n$  равными среднему значению этих величин за то же время.

Постоянную времени нагрева трансформаторов, необходимую для оперирования с выражением (2), мы определяли по формуле Salazin<sup>3</sup>.

Как это показали эксперименты, полученные по этой формуле, значения оказались практически вполне приемлемыми. Пользуясь таблицами для  $q_n$  и  $\cos \Theta$ , о которых сказано выше, мы для широты Закавказья составили таблицу количеств тепла, поступающих в часы солнечного сияния (с 5 до 19 h) на 1  $\text{m}^2$  поверхности, различным образом ориентированной по странам света.

Общее количество тепла, воспринимаемого 1  $\text{m}^2$  за 15 h солнечного сияния, оказалось равным 6455 cal. Для боковой поверхности, обращенной на восток — 2823, на запад — 2823, на юг — 1152 и на север — 503 cal. Наиболее интенсивно, как видно, обогревается горизонтальная поверхность — крышка бака, которая для охлаждения трансформатора не имеет практического значения. Дальнейший ход расчета покажем на частном примере трансформатора TM 100/6. Площадь его крышки ориентировано, по каталожным данным, равна 0,55  $\text{m}^2$ , узкая боковая поверхность — 0,53  $\text{m}^2$ , широкие боковые поверхности — 1,06  $\text{m}^2$ .

Тепло, поглощенное трансформатором за время солнечного сияния (15 h), составит около  $6455 \cdot 0,55 + 2 \cdot 2823 \cdot 1,06 + (503 + 1152) \cdot 0,53 \approx 10400 \text{ cal}$ :

$$q_{\text{сред}} = \frac{10400}{15} \approx 693 \text{ cal/h.}$$

<sup>2</sup> Об учете теплоты, вносимой лучистой энергией солнца через остекленные поверхности зданий.

<sup>3</sup> ETZ, стр. 1317, 1930.

Вычисления производились для более тяжелого случая, когда трансформатор широкими сторонами ориентирован на запад-восток и узкими на север-юг.

Для ориентировочного определения теплоотдачи трансформатора допускаем, что он так рассчитан, что при номинальных потерях (2800 W) его нагрев равен 60°

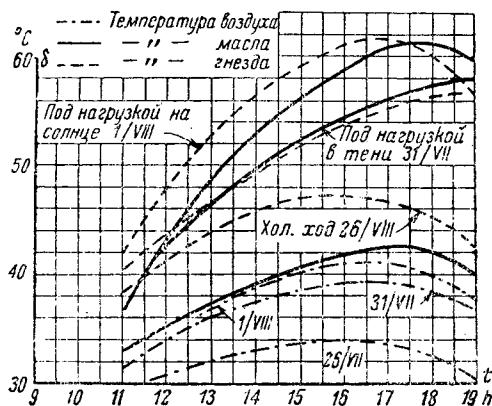


Рис. 1. Кривые нагрева трансформатора 320 kVA

Следовательно,

$$A = \frac{2800}{60} = 40,6 \text{ cal} \text{ и } \tau_{\max} = 0,9 \frac{q_{cp}}{A} = \\ = 0,9 \cdot \frac{693}{40,6} = 17^{\circ},$$

где 0,9 — коэффициент поглощения поверхностью черной матовой окраски.

При ориентировке того же трансформатора узкими сторонами на запад-восток мы получили бы  $\tau_{\max} = 12,2^{\circ}$ , иначе говоря, перегрев снизился более чем на 20%.

Расчеты показали, что с увеличением мощности нагрев трансформатора солнечными лучами уменьшается. Например, при тех же условиях солнечной радиации для трансформаторов TM на 6 kV мощностей 20, 100, 320, 1000 и 1800 kVA мы получили соответственно  $\tau_{\max} = 28,6; 15,3; 11,9; 9,9$  и  $9,0^{\circ}$ .

Полученные перегревы малых трансформаторов (20 и 50 kVA) лучами солнца могут вызвать сомнения. Для 35-kV трансформатора на 20 kVA расчет дает даже  $\tau_{\max} = 55,6^{\circ}$ .

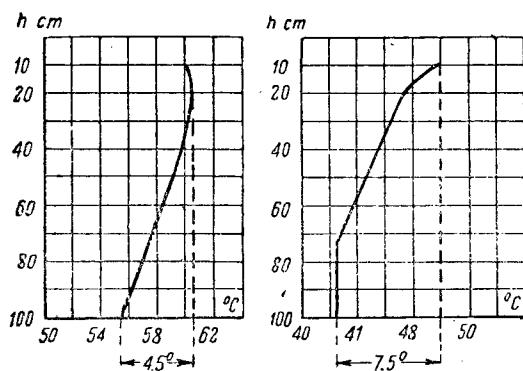


Рис. 2. Распределение температуры по высоте трансформатора 320 kVA при нагрузке (левая кривая) и без нее

И действительно, величины перегревов для малых трансформаторов нуждаются в коррективах, связанных с тем, что как указывает А. В. Корицкий<sup>4</sup>, «Минимальные размеры по ширине и длине задаются изоляционными расстояниями от токоведущих деталей выемной части и не зависят от системы охлаждения». Кроме того, часто по условиям стандартизации для трансформаторов разных мощностей выбирается один и тот же бак, соответствующий высшему напряжению.

<sup>4</sup> Конструирование трансформаторов, гл. VII, стр. 182.

Скорректированные расчеты с учетом этих обстоятельств для 6-kV трансформаторов мощностью соответственно 20 и 50 kVA дают  $\tau_{\max} = 23,3$  и  $16^{\circ}$  и для 35-kV конструкций тех же мощностей — 23,3 и  $24^{\circ}$ .

В действительности же благодаря весьма большой постоянной времени малых трансформаторов они фактически не достигнут и этих температур. Например, для широты 40° достигаемый перегрев может оказаться для трансформатора TM-20/35 всего  $16,7^{\circ}$  вместо указанных  $28,3^{\circ}$ .

Эксперименты. Опыты проводились на специальной опытной площадке и в пределах возможного на эксплуатирующихся подстанциях. На опытной площадке были установлены 3 трансформатора — TM-100/6, TM-180/6 и TM-320/6.

Измерения температур масла производились при нагруженных и отключенных от сети трансформаторах. Трансформаторы по объективным условиям нагружались по методу к. з. приблизительно на 60% номинальной нагрузки.

При нагруженных трансформаторах влияние лучистой теплоты определялось сравнением нагрева трансформатора, подвергающегося действию прямых лучей солнца и затененного специальными щитами.

Термометры вставлялись в специальные гнезда и помещались непосредственно в масло. Кроме того, производились измерения температуры масла по всей высоте трансформатора через каждые 10 см.

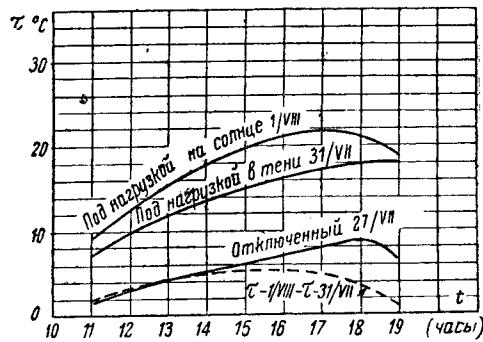


Рис. 3. Перегрев трансформатора 320 kVA

На рис. 1 приведены графики нагрева трансформатора 320 kVA.

Как видно из рис. 1, для ненагруженного трансформатора температуры, измеренные в гнезде и в масле, сильно расходятся, тогда как у нагруженного они почти совпадают. Мы полагаем, что это объясняется тем, что при нагреве трансформатора только солнечными лучами перемешивание масла практически не совершается (это явление подтверждают кривые рис. 2), поэтому термометр, вставленный в гнездо, указывает собственную температуру, а не масла.

Сравнение кривых для масла, полученных 31/VII и 1/VIII, показывает, что при одной и той же нагрузке трансформатора 1/VIII температура масла оказалась значительно выше. Правда, и температура воздуха 1/VIII была несколько выше, чем 31/VII, однако не настолько, чтобы объяснить полученную разность температур. Как известно, в пределах температур воздуха до  $35-40^{\circ}$  превышения температур масла не зависят от температуры воздуха, поэтому для большей убедительности наблюденного нами факта и наглядности на рис. 3 приведены значения этих превышений температур масла над температурой окружающего воздуха.

Рис. 3 показывает, что кривая перегрева незатененного трансформатора идет выше и что по мере уменьшения солнечной радиации (после 17 h) она, снижаясь, подходит близко к кривой перегрева затененного трансформатора.

Весьма интересно то обстоятельство, что фактически полученный максимальный перегрев нагруженного трансформатора ниже, чем расчетный ( $8,8^{\circ}$  по кривой, снятой 27/VII, вместо  $11,9^{\circ}$ ).

Эта разница объясняется тем, что фактические радиации, имевшие место во время опытов (по данным метеорологической обсерватории), были несколько ниже тех, которыми мы пользовались при аналитических расчетах. Пересчет на фактические радиации дает  $\tau_{\max} = 9,4^{\circ}$  — практически приемлемая точность расчета.

Для трансформатора, находящегося под нагрузкой, наблюдается еще более резкое расхождение между расчетными и измеренными данными (5 вместо  $10,3^{\circ}$ ), что следует объяснить упомянутым выше более интенсивным перемешиванием масла у трансформатора, поставленного под нагрузку.

Согласно правому графику рис. 2 (ненагруженный трансформатор) три нижних слоя (по 10 см) имели температуру 42,5°, а средняя температура остальных семи слоев 46,25°. При интенсивном перемешивании средняя температура должна была бы быть 45,2°, а  $\tau_{cp} = 45,2 - 40 = 5,2^\circ$ , где 40° — температура воздуха, отмеченная в этот день.

Таким образом температура масла нагруженного трансформатора (т. е. при интенсивном перемешивании масла) должна была бы возрасти от действия солнечных лучей в среднем на 5,2°. У затененного нагруженного трансформатора была измерена температура 56°, следовательно, на солнце его температура должна была бы увеличиться до 61,2°. Фактически замером было получено 61,5°. Все дальнейшие эксперименты подтвердили изложенные выше соображения.

Учитывая все сказанное, мы можем полагать, что на подстанциях, расположенных вне города, т. е. там, где меньше пыли, и в местностях с сухим воздухом трансформаторное масло (в трансформаторах типа ТМ, на напряжения 6 и 35 кВ) может получить следующие дополнительные перегревы от солнечных лучей (таблица):

| $P(\text{kVA})$                          | 20 | 50 | 180 | 560 | 1800 |
|--|----|----|-----|-----|------|
| $\tau_{\max} (\text{ }^{\circ}\text{C})$ | 12 | 8  | 7   | 6   | 4    |

Эксперименты на работающих подстанциях (Баку, Загес и Рионгэс) также подтвердили правильность изложенной выше методики.

В заключение сделаем некоторые практические выводы.

1. Целесообразно окрашивать кожуха трансформаторов для наружной установки в светлые тона.

2. Четыреугольные в плане трансформаторы следует устанавливать широкими сторонами на север-юг.

3. Меньшую опасность дополнительный перегрев от солнца представляет для трансформаторов подстанций общего пользования, так как у них максимум температуры воздуха и действия солнечных лучей совпадает с минимумом нагрузки.

Заметный перегрев от солнечной радиации может иметь место в трансформаторах тяговых, наземных, шахтных, металлургических и прочих подстанций, максимум нагрузки которых может приходиться на любое время дня; в таких же условиях могут оказаться мачтовые сельскохозяйственные трансформаторы во время электромолотьбы.

## О точных измерениях весьма малых сопротивлений неуравновешенным мостом Матиссена

Инж. А. Я. ВАЙНБЕРГ  
Москва

Современная техника предъявляет все более серьезные требования к методам измерений весьма малых электрических сопротивлений. В первую очередь это относится к точности и нижней границе измеряемых сопротивлений. В качестве примера можно сослаться на требования, связанные с подгонкой и поверкой сопротивлений шунтов к электрическим измерительным приборам высшего класса точности, в частности, к установкам типа Шеринга-Альберти. Требования эти сводятся к необходимости производить измерения сопротивлений величиной менее 0,001  $\Omega$  с точностью 0,01% и выше. Такие же требования начинают фигурировать при точных измерениях мгновенных значений переменных температур, давлений, скоростей потоков, затем при определении свойств и контроле качества специальных сплавов и др.

В одной из предыдущих работ<sup>1</sup> мною были выведены условия решения задачи точных измерений весьма малых сопротивлений для усовершенствованной схемы Фрейтага-Галля. Эта схема хотя и является достаточно простой, но связана с условиями, не всегда выполнимыми на практике. Объясняется это тем, что схема не исключает влияния переходных сопротивлений уравновешивающих плеч и, следовательно, вынуждает применять в уравновешивающих плечах многоомные катушки. В этом отношении схема моста Матиссена<sup>2</sup>

<sup>1</sup> А. Я. Вайнберг. Журн. „Электричество“ № 9, 1940.

<sup>2</sup> АТМ. Т-10, 1931, и Zeitsch. f. Instrum., стр. 122, № 3, 1935.

обладает более широкими возможностями. Однако схема моста Матиссена весьма усложняет процесс измерений. Это является отрицательной характеристикой, ограничивающей ее применение. Последнее относится к случаю измерений на базе нулевого метода. В случае же измерений методом интерполяции процесс измерений легко выполним.

Задачей данной работы является вывод условий точных измерений весьма малых сопротивлений для схемы моста Матиссена на базе метода интерполяции.

Схема измерений представлена на рис. 1. Обозначим:

- $R_g$  — внутреннее сопротивление гальванометра в омах,  
 $k$  — постоянная гальванометра,  
 $\alpha_1, \alpha_{II}, \alpha_{III}$  и  $\alpha_{IV}$  — показания гальванометра при включении, соответственно, в цепи I, II, III и IV при  $R' = R'' = \infty$ ,  
 $\alpha'_1, \alpha'_{II}, \alpha'_{III}$  и  $\alpha'_{IV}$  — то же, при  $R' = R'' \neq \infty$ ,  
 $\beta'_1, \beta'_{II}, \beta'_{III}$  и  $\beta'_{IV}$  — то же, при изменении направления тока  $I_0$ ,  
 $\beta_1, \beta_{II}, \beta_{III}$  и  $\beta_{IV}$  — то же, при  $R' = R'' = \infty$ .

Введем сокращенные обозначения:

$$\left. \begin{aligned} r_1 + r'_1 &= r_{a_1}; & r_2 + r'_2 &= r_{a_2}; & r_3 + r'_3 &= r_{a_3}; \\ r_4 + r'_4 &= r_{a_4}; & r_5 + r'_5 &= r_{a_5}; & r_6 + r'_6 &= r_{a_6}; \\ R' + r'_7 &= R'_a; & R'' + r'_8 &= R''_a; & R_g + r'_g &= R_g; \\ R_g + R'_{10} &= R'_{gII}; & R_g + r'_{11} &= R'_{gIII}; & R_g + r'_{12} &= R'_{gIV}; \\ \frac{R_2 R'_a}{R_2 + R'_a} &= R'_{a_2}; & \frac{R_3 \cdot R''_a}{R_3 + R''_a} &= R'_{a_3}. \end{aligned} \right\} (1)$$

Пусть параметры схемы рис. 1 подобраны так, что при  $R' = R'' = \infty$  включение в цепи I, II, III и IV гальванометра  $G$  вызывает отклонение его подвижной системы на углы соответственно  $\alpha_1, \alpha_{II}, \alpha_{III}$  и  $\alpha_{IV}$ , не выходящие за пределы шкалы. В таком случае легко составить восемь уравнений Кирхгофа: первое — для контура  $R_x r'_1 R_g R'_2 r'_4 r'_4 r'_2$ , второе — для контура  $r'_1 R_1 r'_3 r'_6 R_8 r'_5 r'_5 R_g r'_g$ , третье — для контура  $R_x r'_1 r'_1 R_g \times r'_5 r'_5 R_2 r'_4 r'_2$  и т. д.

Решая полученные восемь уравнений, после элементарных преобразований, получаем:

$$R_1 R_2 - R_3 R_x = \alpha_1 N_I + \alpha_{II} N_{II} - \alpha_{III} N_{III} - \alpha_{IV} N_{IV} + C_1, \quad (2)$$

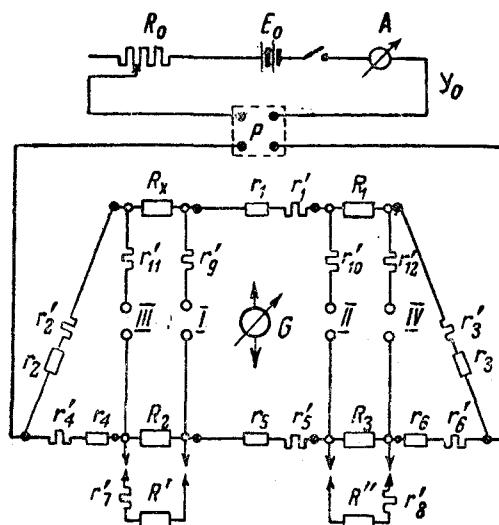


Рис. 1

$R_x$  — измеряемое сопротивление,  $R_1, R_2$  и  $R_3$  — образцовые катушки сопротивления,  $r_1, r_2$  и  $r_3$  — вспомогательные постоянные сопротивления,  $r_4, r_5$  и  $r_6$  — вспомогательные переменные сопротивления,  $R'$  и  $R''$  — интерполяционные сопротивления,  $r_7, r_8 \dots r_{12}$  — переходные сопротивления,  $P$  — переключатель направления тока,  $G$  — гальванометр, включаемый в цепи I, II, III и IV,  $J_0$  — рабочий ток (потенциальные зажимы обозначены кружочками, а токовые — точками).

где

$$\left. \begin{aligned} N_I &= \frac{R_3 k}{D I_0} [R_g B + (r_{a_1} + R_1 + r_{a_2} + r_{a_3} + R_3 + r_{a_4}) \times \\ &\quad \times (R_x + r_{a_2} + r_{a_4} + R_2)]; \\ N_{II} &= \frac{R_2 k}{D I_0} [R_g B + (R_1 + r_{a_3} + r_{a_5} + R_3) \times \\ &\quad \times (r_{a_1} + R_x + r_{a_2} + r_{a_4} + R_2 + r_{a_5})]; \\ N_{III} &= \frac{R_3 k}{D I_0} [R_g B + (R_x + r_{a_1} + R_1 + r_{a_3} + r_{a_6} + R_3 + \\ &\quad + r_{a_5} + R_2) \cdot (r_{a_2} + r_{a_4})]; \\ N_{IV} &= \frac{R_2 k}{D I_0} [R_g B + (r_{a_3} + r_{a_6}) \times \\ &\quad \times (R_1 + r_{a_1} + R_x + r_{a_2} + r_{a_4} + r_{a_5} + R_2 + R_3)]; \\ D &= R_2 + R_3 + r_{a_4} + r_{a_5} + r_{a_6}; \\ B &= R_1 + R_2 + R_3 + R_x + r_{a_1} + \\ &\quad + r_{a_2} + r_{a_3} + r_{a_4} + r_{a_5} + r_{a_6}; \end{aligned} \right\} (3)$$

$C_1$  — выражение, учитывающее влияние термотоков.

С целью устранения влияния термотоков меняем направление тока  $I_0$ . В этом случае получаем:

$$R_1 R_2 - R_3 R_x = -[\beta_I N_I - \beta_{II} N_{II} + \beta_{III} N_{III} + \beta_{IV} N_{IV}] - C_1. \quad (4)$$

Среднее арифметическое выражений (2) и (4) будет:

$$\begin{aligned} R_1 R_2 - R_3 R_x &= \\ &= 0,5 [(\alpha_I - \beta_I) N_I + (\alpha_{II} - \beta_{II}) N_{II} - \\ &\quad - (\alpha_{III} - \beta_{III}) N_{III} - (\alpha_{IV} - \beta_{IV}) N_{IV}]. \end{aligned} \quad (5)$$

Если найти такое значение  $R_2$  или  $R_3$ , при котором правая часть формулы (5) равна нулю, то получим простую формулу для определения  $R_x$ :

$$R_x = \frac{R_1 R_2'}{R_3} \text{ или } R_x = \frac{R_1 R_2}{R_3'}, \quad (6)$$

где  $R_2'$  или  $R_3'$  — значения плеч  $R_2$  и  $R_3$ , при которых правая часть (5) становится равной нулю. Таким образом задача сводится к нахождению значений плеч  $R_2'$  или  $R_3'$ .

Математическая задача сводится к нахождению значения аргумента по нулевому значению функции. Решение этой задачи возможно<sup>8</sup>, если известны значения функций, соответствующие двум значениям аргумента, лежащим по обе стороны от искомого. За одно из значений функций можно принять то, которое соответствует  $R' = R'' = \infty$ , т. е. выражение (5). Другое значение функции получится при включении интерполяционного сопротивления  $R'$  или  $R''$  такой величины, которое меняет знак правой части (5).

**Случай 1:**  $R' \neq \infty$  и  $R'' = \infty$ . Путем, аналогичным указанному выше, получаем:

$$R_1 R_2 - R_3 R_x = 0,5 [(\alpha'_I - \beta'_I) N'_I + (\alpha'_{II} - \beta'_{II}) N'_{II} - \\ - (\alpha'_{III} - \beta'_{III}) N'_{III} - (\alpha'_{IV} - \beta'_{IV}) N'_{IV}], \quad (7)$$

где  $N'_I$ ,  $N'_{II}$ ,  $N'_{III}$  и  $N'_{IV}$  соответствуют выражениям для  $N_I$ ,  $N_{II}$ ,  $N_{III}$  и  $N_I$  (3), в которых  $R_2$  заменено на  $R'_{a_2}$ .

Осуществляя интерполяцию, после элементарных преобразований получаем;

$$R_x = \frac{R_1 R_2}{R_3} \left[ 1 - A \frac{R_2}{R_2 + R'_a} \right], \quad (8)$$

где:

$$A = \frac{\Delta_1}{\Delta_1 + \Delta_2};$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta_1 &= [(\alpha_I - \beta_I) + (\alpha_{II} - \beta_{II}) M_1 - (\alpha_{III} - \beta_{III}) M_2 - \\ &\quad - (\alpha_{IV} - \beta_{IV}) M_3]; \\ \Delta_2 &= -[(\alpha'_I - \beta'_I) M_4 + (\alpha'_{II} - \beta'_{II}) M_5 - \\ &\quad - (\alpha'_{III} - \beta'_{III}) M_6 - (\alpha'_{IV} - \beta'_{IV}) M_7]; \\ M_1 &= \frac{N_{II}}{N_I}; \quad M_2 = \frac{N_{III}}{N_I}; \quad M_3 = \frac{N_{IV}}{N_I}; \quad M_4 = \frac{N'_I}{N_I}; \\ M_5 &= \frac{N'_II}{N_I}; \quad M_6 = \frac{N'_III}{N_I}; \quad M_7 = \frac{N'_IV}{N_I}. \end{aligned} \right\} (9)$$

Дальнейшая задача состоит в упрощении полученных формул (8) — (9), что легко осуществляется, если воспользоваться известным критерием ничтожных погрешностей<sup>4</sup>. Действительно, в случае измерений весьма малых сопротивлений не представляет труда подобрать значения параметров схемы так, чтобы имели место следующие неравенства:

$$\begin{aligned} r'_7 &\leqslant 0,4 |d R'|; \quad r'_9 \leqslant 0,4 |d R_g|_M; \quad r'_{10} \leqslant 0,4 |d R_g|_M; \\ r'_{11} &\leqslant 0,4 |d R_g|_M; \quad r'_{12} \leqslant 0,4 |d R_g|_M; \quad [R_x + \\ + (R_2 - R'_{a_2})] &\leqslant 0,4 |d R_2|_M; \quad (r_2 + r'_2 + r'_4) \leqslant 0,4 |d r_4|_M; \\ (r_1 + r'_1 + r'_5) &\leqslant 0,4 |d r_5|_M; \\ (r_3 + r'_3 + r'_6) &\leqslant 0,4 |d r_6|_M, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $|d R'|$  — модуль абсолютной погрешности величины  $R'$  в выражении (8), а  $|d R_g|_M$ ,  $|d r_2|_M$ ,  $|d r_5|_M$ ,  $|d r_4|_M$  и  $|d r_6|_M$  — модули абсолютных погрешностей величин  $R_g$ ,  $R_2$ ,  $r_5$ ,  $r_4$  и  $r_6$ , входящих в выражения (9).

Если условия (10) выполнены, то, применяя критерий ничтожных погрешностей, величинами  $r'_7$  в выражении (8) и  $r'_9$ ,  $r'_{10}$ ,  $r'_{11}$ ,  $r'_{12}$ ,  $[R_x + (R_2 - R'_{a_2})]$ ,  $(r_2 + r'_2 + r'_4)$ ,  $(r_1 + r'_1 + r'_5)$ ,  $(r_3 + r'_3 + r'_6)$  в выражении (9) можно пренебречь без заметного увеличения погрешности измерений  $R_x$ . Тогда формула определения  $R_x$  принимает следующий вид, удобный для практического применения:

$$R_x = \frac{R_1 R_2}{R_3} \left[ 1 - A \frac{R_2}{R_2 + R'} \right], \quad (11)$$

где:

$$\begin{aligned} A &= \frac{\Delta_1}{\Delta_1 + \Delta_2}; \\ \Delta_1 &= [(\alpha_I - \beta_I) + (\alpha_{II} - \beta_{II}) M_1 - \\ &\quad - (\alpha_{III} - \beta_{III}) M_2 - (\alpha_{IV} - \beta_{IV}) M_3]; \\ \Delta_2 &= -[(\alpha'_I - \beta'_I) + (\alpha'_{II} - \beta'_{II}) M_4 - (\alpha'_{III} - \beta'_{III}) M_5 - \\ &\quad - (\alpha'_{IV} - \beta'_{IV}) M_6]; \\ M_1 &= \frac{R_2 [R_g H + (R_3 + r_6) \cdot (r_4 + R_2 + r_5)]}{R_3 E}; \\ M_2 &= \frac{R_g H + (R_3 + r_6 + r_5 + R_2) r_4}{E}; \\ M_3 &= \frac{R_2 [R_g H + r_6 (R_3 + r_5 + R_2 + r_4)]}{R_3 E}; \\ H &= R_2 + R_3 + r_4 + r_5 + r_6; \\ E &= [R_g H + (R_2 + r_4) \cdot (R_3 + r_5 + r_6)]. \end{aligned} \quad (12)$$

**Случай 2:**  $R' = \infty$  и  $R'' \neq \infty$ .

Аналогично первому случаю, получаем:

$$R_x = \frac{R_1 R_2}{R_3} \cdot \frac{1}{\left[ 1 - A \frac{R_3}{R_3 + R''} \right]}, \quad (13)$$

где  $A$  — соответствует выражению (12).

Теперь перейдем к определению условий измерения  $R_x$  с заданной вероятной погрешностью результата  $\pm \frac{d R_x}{R_x}$ . Согласно закону накопления средних погрешностей и пре-

<sup>8</sup> Стефенсон. Теория интерполяции, 1935.

<sup>4</sup> См. Маликов М. Ф. Точные измерения, 1935.

небрежая погрешностями второго порядка малости, получаем выражения для погрешностей отдельных параметров в следующем виде:

$$\left| \frac{dR_n}{R_n} \right| \leq 0,3 \left| \frac{dR_x}{R_x} \right|; \quad \left| \frac{dR}{R} \right| \leq 0,3 \left| \frac{m}{A} \frac{dR_x}{R_x} \right|;$$

$$|d(\alpha - \beta)| \leq 0,075 \left| m (\Delta_1 + \Delta_2)^2 \frac{dR_x}{R_x} \right|;$$

$$\left| \frac{dF}{F} \right|_M \leq 0,3 \times$$

$$\times \left| \sqrt{\frac{m}{i_1^2 \left( \frac{\partial M_1}{\partial F} \right)^2 + i_2^2 \left( \frac{\partial M_2}{\partial F} \right)^2 + i_3^2 \left( \frac{\partial M_3}{\partial F} \right)^2 R_x}} \frac{dR_x}{R_x} \right|, \quad (14)$$

где:

$$R_n = R'_1 R_2 \text{ и } R_3; \quad R = R' \text{ или } R'', \quad m = \frac{R'}{R_2} \text{ или } \frac{R''}{R_3};$$

$$i_1 = \frac{1}{(\Delta_1 + \Delta_2)^2} [\Delta_2 (\alpha_{II} - \beta_{II}) + \Delta_1 (\alpha'_{II} - \beta'_{II})];$$

$$i_2 = \frac{1}{(\Delta_1 + \Delta_2)^2} [\Delta_2 (\alpha_{III} - \beta_{III}) + \Delta_1 (\alpha'_{III} - \beta'_{III})];$$

$$i_3 = \frac{1}{(\Delta_1 + \Delta_2)^2} [\Delta_2 (\alpha_{IV} - \beta_{IV}) + \Delta_1 (\alpha'_{IV} - \beta'_{IV})];$$

$$F = R_2, R_3, R_g, r_4, r_5 \text{ и } r_6;$$

$$d(\alpha - \beta) = [\Delta_2 d(\alpha_1 - \beta_1)], \quad [\Delta_2 M_1 d(\alpha_{II} - \beta_{II})],$$

$$[\Delta_1 d(\alpha'_1 - \beta'_1)], \quad [\Delta_1 M_1 d(\alpha'_{II} - \beta'_{II})], \quad [\Delta_2 M_2 d(\alpha_{III} - \beta_{III})],$$

$$[\Delta_1 M_2 d(\alpha'_{III} - \beta'_{III})], \quad [\Delta_2 M_3 d(\alpha_{IV} - \beta_{IV})]$$

$$\text{и } [\Delta_1 M_3 d(\alpha'_{IV} - \beta'_{IV})].$$

Знак  $d$  выражает абсолютную погрешность соответствующего параметра.

$M_1, M_2$  и  $M_3$ , а также  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  соответствуют выражениям (12). В свою очередь  $\frac{\partial M_1}{\partial F}, \frac{\partial M_2}{\partial F}$  и  $\frac{\partial M_3}{\partial F}$  представляют собой соответствующие частные производные.

Выражения (14) являются условиями определения  $R_x$  по формулам (13) и (11) с заданной вероятной погрешностью результата. Подставляя (14) в (10), получаем условия применимости рабочих формул (13) и (11) определения  $R_x$ .

Вышеизложенное позволяет описать процесс измерений, распадающийся на 4 этапа.

Первый этап заключается в вычислении значений элементов схемы, требуемых согласно условиям (10) и (14).

Вторым этапом является практическое осуществление схемы рис. 1, элементы которой должны соответствовать значениям, вычисленным в первом этапе.

Третий этап состоит в осуществлении самих измерений. Для этого требуется, чтобы включение гальванометра  $G$  в цепи I, II, III и IV не вызывало бы отклонений его подвижной системы, выходящих за пределы шкалы. Это обеспечивается регулировкой  $r_4, r_5$  и  $r_7$  в следующем порядке: цепи III и IV замыкаются временными перемычками. Далее,  $r_5$  регулируется так, чтобы при переключении  $G$  с цепи I в цепь II углы поворота подвижной системы гальванометра были бы одного порядка. Затем перемычка с цепи III снимается и регулировкой  $r_4$  добиваются поворота подвижной системы приблизительно на тот же угол, как и при включении гальванометра в цепи I и II. После этого перемычка снимается с цепи IV и аналогично регулируется величина  $r_7$ . Наконец, отмечаются 16 показаний гальванометра  $G$ , соответствующих включению его в цепи I, II, III и IV (четыре — при  $R' = R'' = \infty$ , затем четыре — при  $R' \neq \infty$  или  $R'' \neq \infty$  и, наконец, восемь — при измененном направлении тока  $I_0$ ). Легко показать, что требование изменения знака в правой части (5) эквивалентно требованию наличия у  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  противоположных знаков, так что величина  $R'$  или  $R''$  подбирается такой, чтобы удовлетворилось это последнее условие.

Четвертый этап состоит в определении искомого значения  $R_x$  путем вычисления по формуле (11) или (13). Все вычисления выполняются просто при помощи арифмометра.

На практике нет необходимости повторять первый этап при каждом цикле измерений. Задаваясь предельными значениями  $R_x$  и  $\frac{dR_x}{R_x}$ , следует вычислить соответствующие им значения параметров схемы. Эти параметры кладутся в основу измерительной установки, могущей служить для измерений в пределах заданных величин.

Обычно  $r'_1, r'_2, r'_3$  и т. д. берутся в виде соответствующего монтажного провода. В свою очередь  $r'_1, r'_2$  и  $r'_3$  берутся в виде магнитных катушек сопротивлений порядка  $0,01 \Omega$ . Назначение магнитных сопротивлений состоит в повышении электрической устойчивости схемы, в частности, путем уменьшения температурного коэффициента цепей  $r'_1, r'_2$  и  $r'_3$ . В свою очередь,  $R', R'', r_4, r_5$  и  $r_6$  должны быть переменными. Их удобно брать в виде прецизионных магазинов сопротивления<sup>5</sup>. В качестве  $R_1, R_2$  и  $R_3$  используются образцовые катушки сопротивлений I класса точности, причем возможно применение также переходных катушек сопротивлений, отвечающих требованиям, предъявляемым к катушкам сопротивлений I класса.

<sup>5</sup> При заданном  $\frac{dR_x}{R_x}$  равном около  $5 \cdot 10^{-3}\%$ , погрешности применяемых магазинов сопротивлений могут быть до 1%.

## Четырехлучевой катодный осциллограф с вращающейся в вакууме кассетой

B. A. ВЕСЕЛЫЙ и C. M. ФЕРТИК  
Харьковский электротехнический институт

Лаборатория высоких напряжений ХЭТИ разработала по заказу треста Донэнерго новую конструкцию многолучевого металлического катодного осциллографа, специально предназначенного для исследования процессов выключения в высоковольтных аппаратах<sup>1</sup>.

В новой конструкции попытались добиться известной универсальности прибора и сделать его пригодным для самых различных высоковольтных исследований. Авторы также пытались по возможности уменьшить эксплоатационные недостатки обычных катодных осциллографов с непрерывной откачкой, в первую очередь за счет улучшения вакуумных уплотнений и всей насосной установки.

Технические данные и общая компоновка прибора. Катодный осциллограф, ниже сокращенно обозначаемый УКО-4, оформлен в виде железной сварной конструкции, отдельные части которой соединены при помощи резиновых вакуумных уплотнений (рис. 1).

УКО-4 имеет две двухлучевые высоковольтные катодные трубки, что дает возможность производить одновременную запись четырьмя лучами четырех различных явлений. Каждая пара электронных лучей проходит особую камеру концентрации, внутри которой помещены запирающие пластинки и концентрирующая катушка, образующая две магнитные линзы.

В камере отклонения установлены на стержнях вводов две пары отклоняющих пластинок электрической временной развертки. Каждая пара пластин дает возможность производить разворот одновременно обоих пучков сдвоенной катодной трубки.

Для независимого управления четырьмя катодными пучками имеется 6 пластин явлений, образующих 4 конденсатора. Взаимное влияние полей отклоняющих конденсаторов ослаблено тем, что средней пластине приданы большие размеры. Для надежной экранировки отклоняющих пластин обеих трубок камера разделена в продольном направлении железной перегородкой на две части. Камера отклонения имеет еще одну дополнительную пару отклоняющих пластин, которая предназначена для одновременного смещения всех пучков в вертикальном направлении с целью увеличения общей длины записи (например, при записи по спирали на барабане кассеты механического временного разворота).

В УКО-4 внутри одной камеры на сравнительно небольших расстояниях друг от друга проходят несколько электронных пучков, направленных под произвольными углами и возможно даже пересекающихся. Это заставило исследовать вопрос о взаимодействии электронных пучков, так как опасались возможности искажения записей исследуемых процессов.

Расчеты показали [1], что в интересующем нас осциллографе с холодным катодом и напряжениях на катодной трубке выше 10 000 V искажение записи под влиянием электромагнитного взаимодействия электронных пучков практически не имеет места.

Электрические вводы в камеру отклонений заключены

<sup>1</sup> В разработке конструкции, кроме авторов статьи, принимали участие студент К. Ф. Киселев и техник П. И. Татаренко.

в железный экран, внутри которого расположен также коммутатор, позволяющий быстро производить последовательную запись исследуемого явления, градуировочного напряжения, градуировки времени и нулевой линии.

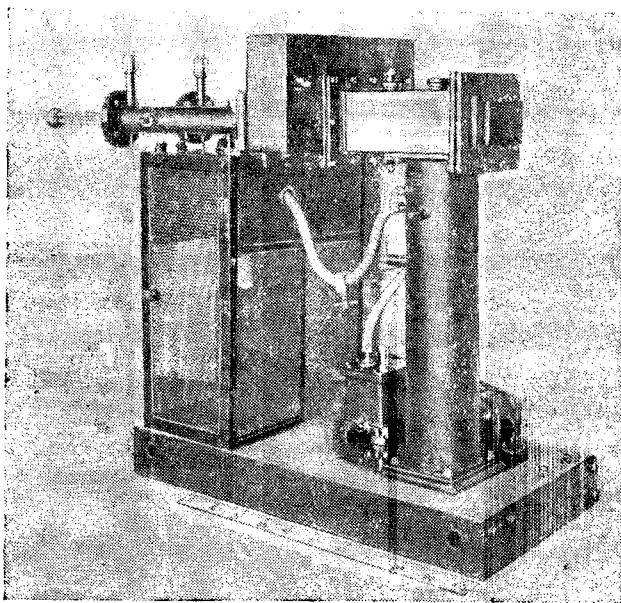


Рис. 1. Катодный осциллограф УКО-4 с кассетой для съемки на неподвижную фотобумагу

К камере отклонений на резиновом уплотнении могут присоединяться устройства для различных способов съемки. Для внешней съемки по контактному способу (электрический временной разворот) к камере отклонений прикрепляется передний фланец, в котором имеется целлулоидное окно размером  $10 \times 15$  см, покрытое изнутри люминифором. Конструкция окна выполнена на резиновых уплотнениях без замазки.

Съемки можно производить с помощью однозарядной или многозарядной кассеты прикладного типа, на конструкции которых мы здесь не будем останавливаться.

Описание устройства для съемки с механическим временными разворотом дано ниже.

Вакуумная установка состоит из одного форвакуумного и одного или двух, в зависимости от способа съемки, высоковакуумного насоса.

В качестве высоковакуумного насоса можно применить ртутный диффузионный насос или же масляный высоковакуумный. Подача воздуха в катодные трубы производится при помощи двух дифференциальных дросселей.

Контроль вакуума в катодных трубках осуществляется двумя электрическими вакуумметрами, а в форвакуумном бачке — U-образным ртутным манометром.

Корпус осциллографа с одной стороны жестко присоединен к форвакуумному бачку круглой формы, а с другой стороны опирается на железный шкап. Шкап содержит градуировочные установки, схему независимой временной разворотки и высоковакуумный насос.

Осциллограф управляет с отдельно стоящего щитка (рис. 2), на котором, кроме аппаратуры управления, смонтированы измерительные приборы.

Перейдем теперь к рассмотрению отдельных особенностей новой конструкции.

**Получение нескольких электронных лучей.** Известны два основных способа получения в катодном осциллографе нескольких электронных лучей. Наибольшее распространение в настоящее время получил способ вырезывания из одного электронного пучка нескольких частей с помощью диафрагм и электростатических экранов (Knoll [2], Bockels и Dicks [3], Kan-Kasai [4] и др.).

Другой способ состоит в применении в одном приборе нескольких совершенно независимых разрядных трубок, как это сделал, например, Koch [5], позднее фирма Trüb, Tauber Co [6], Welpton [7] и др. Mattias [8] применил комбинацию обоих способов, использовав две двухлучевые трубы.

Стремясь к максимальной простоте обслуживания прибора и наибольшей его компактности, мы поставили перед собой задачу получить два пучка в устройстве с общим вакуумом; общей концентрирующей катушкой и без применения добавоч-

ных электростатических полей для установки пучков. Конструкция разработанного нами устройства видна из рис. 3.

Две стеклянные трубы 1 армируются при помощи резиновых прокладок 2 на фланце 3. Навинчивая на фланец колпачковую гайку 4, можно при помощи железной прокладки 5

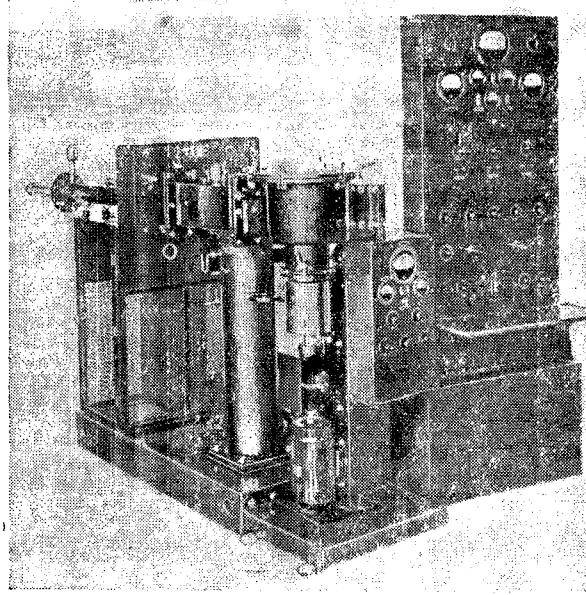


Рис. 2. Катодный осциллограф УКО-4 с вращающейся кассетой для механического разворота

сжать резину в такой мере, чтобы обеспечить плотное прилегание резины к стеклу трубок и внутренней поверхности патрубка фланца. Таким путем легко получается надежное вакуумное уплотнение.

Аналогично осуществляено вакуумное уплотнение и со стороны катодов. Общий катододержатель 6 крепится на конце стеклянных трубок и против каждой из них имеется отверстие для катода 7.

Навинченный на ножку 8 катод может легко выниматься и вставляться без разборки самой трубы. Это очень удобно в эксплуатации при полировка или замене катода, так как ускоряет эту операцию и не нарушает установки самой трубы.

Ножки катодов крепятся в катододержателе при помощи резиновых прокладок 9. Варьируя при помощи винтов 10 степень сжатия резины, можно менять положение катода относительно оси трубы, что очень упрощает наладку пучков.

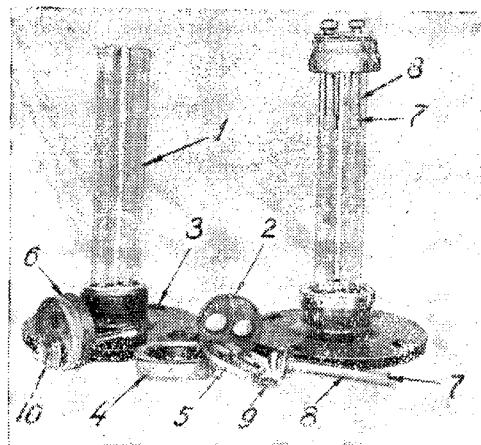


Рис. 3. Двухлучевая разрядная трубка в собранном (справа) и разобранном (слева) виде

В обеих стеклянных трубках устанавливается общий вакуум, регулируемый дроссельным краном.

Концентрация обоих пучков, проходящих на расстоянии 25 mm друг от друга, производится с помощью сдвоенной магнитной линзы оригинальной конструкции, помещенной

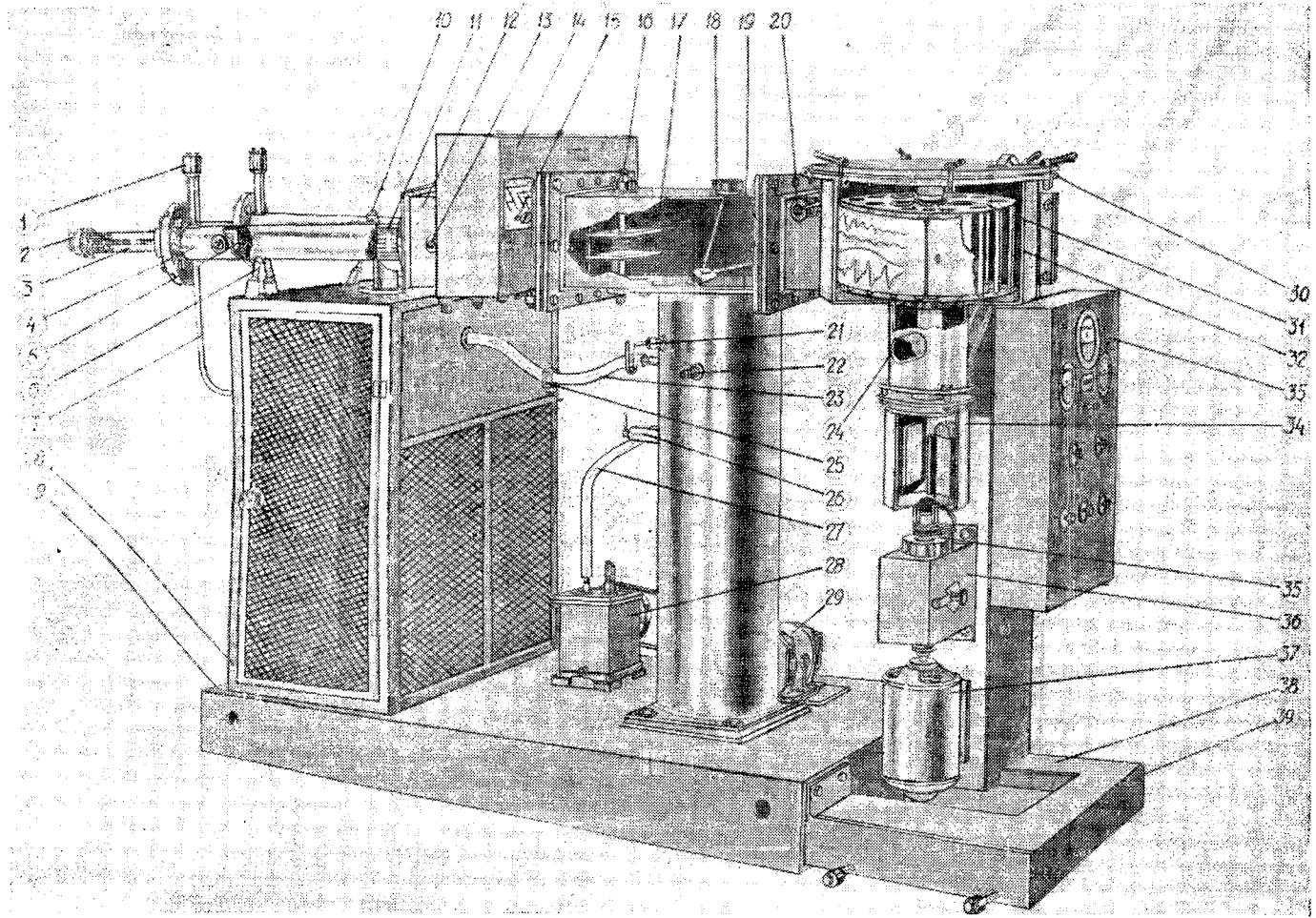


Рис. 4. Схема устройства осциллографа УКО-4

1 — вакуумметр, 2 — катододержатель, 3 — катодные трубы, 4 — камера концентрации, 5 — запирающие пластины, 6 — упорные винты, 7 — трубка к дросселю, 8 — шкап, 9 — плита опорная, 10 — низковольтный ввод для концентрирующей катушки, 11 — концентрирующая катушка, 12 — камера отклонения, 13—16 — высоковольтный ввод, 14 — экран коммутатора и вводов, 15 — ручка коммутатора, 17 — пластины для сдвига всех пучков по вертикали, 18 — окно для наблюдений, 19 — форвакуумный бачок, 20 — ручка поворотного экрана, 21 — ртутный манометр, 22 — штуцер для присоединения конденсационного насоса к форвакуумному бачку, 23 — 27 — резиновая трубка, 24 — патрубок для откачки камеры вращающейся кассеты, 25 — переключим экран, 26 — трехходовой кран, 28 — масляный ротационный насос, 29 — двигатель масляного насоса, 30, 31, 32 — крышка барабана и кожух вращающейся кассеты, 33 — щит управления кассетой, 34 — электромагнитная муфта, 35 — щетки для питания электромагнитной муфты, 36 — редуктор, 37 — двигатель, 38 — резиновый коврик, 39 — колонка вращающейся кассеты

внутри камеры концентрации. Одна общая обмотка возбуждения питает обе магнитные линзы.

Испытания описанного выше устройства для получения двух пучков показали достаточную надежность и устойчивость работы наряду со следующими значительными эксплуатационными преимуществами, заключающимися в следующем: а) отсутствуют вакуумные уплотнения на замазке, шлифы, конуса и т. п., б) легкая и независимая установка отдельных пучков на экране чисто механическим путем (поджимание резиновых прокладок), без помощи установочных магнитов или электростатических полей, в) электронные пучки достаточно богаты электронами; г) легко и быстро производятся монтаж и демонтаж трубки, д) хорошая фокусировка обоих пучков при малых размерах концентрирующей катушки.

Число отдельных пучков в катодной трубке такого устройства без труда может быть доведено до четырех.

В осциллографе УКО-4 мы установили две независимые спаренные разрядные трубы, а не одну четырехлучевую трубку, что позволило получить большую гибкость в работе (одновременно может производиться запись осцилограммами пучками различной чувствительности).

**Вращающаяся кассета для внутривакуумной съемки.** В тех случаях, когда общая продолжительность изучаемого явления очень велика по сравнению с продолжительностью отдельных его элементов, подлежащих детальному изучению, необходимо по возможности увеличивать полную длину записи. Этого можно достичь с помощью специальных схем разворота [9, 10]. Электронный луч при этом заставляют описывать на фотопластинке окружность, синусоиду или пилообразную кривую, на которую накладывают исследуемое явление. Однако получаемые таким путем осцилограммы мало наглядны и поддаются расшифровке лишь с большим трудом.

Значительно лучшие результаты можно получить в катодном осциллографе с помощью механического временного раз-

ворота и записи явления на фотобумагу большой длины. С этой целью съемку производят на вращающуюся кассету барабанного типа, которая позволяет довести полную длину осцилограммы до  $0.5 \div 2$  м. В случае необходимости длина записи легко может быть увеличена еще в  $10 \div 20$  раз с помощью комбинаций механического и электрического разворота. Скорость движения фотобумаги достигает  $25 \div 50$  и даже  $100$  м/сек.

Вращающаяся кассета обычно помещается внутри осциллографа в вакууме (Sickle и Berkley [9], Trüb, Tauber Co [6], Welpton [7], Whipple [10] и др.), что значительно улучшает качество съемки, впрочем, цену некоторого усложнения конструкции. В осциллографе Mattias [8] вращающийся барабан находится вне камеры осциллографа, и съемка производится с помощью фотообъектива.

В описываемом осциллографе предусмотрена внутренняя съемка. Для передачи движения в вакуум применена следующая простая и гибкая схема.

В воздухе расположена электромагнитная муфта (рис. 4), приводимая во вращение через редуктор универсальным двигателем мощностью 300 Вт изготовления ХЭТИ. Железный цилиндр муфты жестко укреплен на валу редуктора. Внутри цилиндра укреплены два индуктора, на которых размещены обмотки, питаемые постоянным током, подводимым в муфту щетками через кольца, укрепленные на валу редуктора.

Якорь муфты, находящийся в вакууме, окружен специальным стаканом из гетинаксовой трубы, стенки которого помещены в зазоре муфты. Испытания стакана показали, что гетинакс достаточно хорошо держит высокий вакуум. Полная радиальная длина между железного пространства составляет 2,7 мм при толщине стенки трубы 1 мм.

Для устранения вибраций свободный конец электромагнитной муфты связан с кожухом вращающейся кассеты при помощи шарикового подшипника.

Электромагнитная муфта имеет специальную защелку для стопорения ее в определенном положении. Предусмотрено 6 неподвижных положений муфты для того, чтобы можно было при желании производить осциллографирование с электрической временной разверткой на неподвижный барабан.

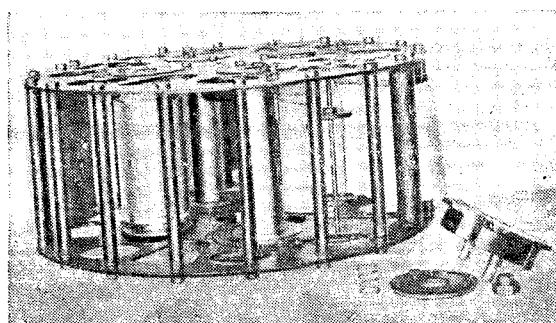


Рис. 5. Барабан многозарядной вращающейся в вакууме кассеты

Вращающаяся кассета помещена в сварной (из листового железа) кожух, который сверху прикрывается крышкой с резиновым уплотнением.

При наладке пучков окно кассеты прикрывается поворотным люминесцирующим экраном, при съемке оно открывается при помощи рукоятки, которая насажена на валик, проходя-

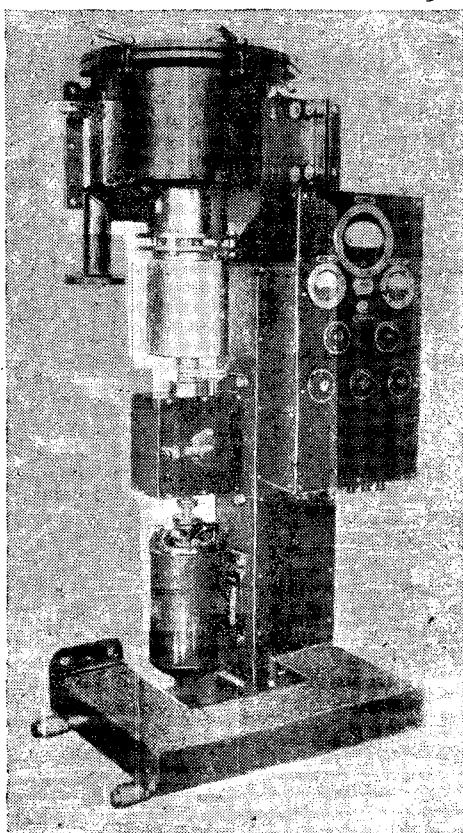


Рис. 6. Вращающаяся кассета с приводом и щитком управления

щий внутрь кожуха кассеты через резиновое уплотнение, аналогичное примененным в катодных трубках (см. выше) и позволяющее поворачивать валик, не нарушая вакуума.

Все описанные в литературе осциллографы с внутривакуумным механическим временными разворотом, насколько нам известно, не позволяют перезаряжать кассету без нарушения вакуума. Необходимость нарушения вакуума после каждого снимка связана со значительной бесполезной затратой времени между последовательными съемками, что в многих случа-

ях очень неудобно, в особенности при испытаниях в условиях эксплуатации.

Вращающаяся кассета в УКО-4 изготовлена многозарядной.

При осуществлении такой кассеты возникли значительные трудности, связанные прежде всего с тем, что управление перезарядкой должно производиться извне, без нарушения вакуума и по возможности без дополнительных вводов в вакуум. Кроме того, необходимо, учитывая большую скорость, обеспечить надежную статическую и динамическую уравновешенность вращающихся масс, которая при перематывании бумаги будет все время нарушаться в результате облегчения одной катушки и утяжеления другой.

Задачу надежной балансировки барабана удалось разрешить сравнительно просто путем установки внутри барабана добавочной пары «балансовых» катушек, расположенных симметрично первым двум рабочим катушкам и перематывающих синхронно с ними холостую бумажную ленту. Тем самым автоматически компенсируется нарушение уравновешенности, создаваемое «рабочими» катушками.

Устройство барабана вращающейся кассеты, вынутой из кожуха, видно на рис. 5.

Полный заряд фотобумаги удалось довести до 10 м и, таким образом, обеспечить возможность десяти последовательных съемок без нарушения вакуума.

Механические испытания вращающейся кассеты показали удовлетворительную работу механизма. При трех тысячах оборотов в минуту вибрация кассеты была незначительна.

Вращающаяся кассета снабжена коммутатором для синхронизации работы схемы катодного осциллографа и вращающейся кассеты.

Весь механизм кассеты смонтирован на отдельной колонке (рис. 6), что позволяет одному человеку производить присоединение кассеты к осциллографу.

## Литература

1. В. А. Веселый, С. М. Фертик. Взаимодействие электронных пучков в многолучевом катодном осциллографе. Сборник научно-технических статей ХЭТИ, вып. VI, 1940.
2. M. Knoll. Mehrfachkatodenstrahlzillograph. ETZ., v. 53, S. 110, 1932.
3. H. Bockels, H. Dicks. Ein neuer Mehrfachkatodenstrahlzillograph. Arch. f. El., Bd XXVII, S. 134, 1938.
4. Kan-Kasa i. The technique involved in Investigations on Involuntary Transient Phenomena. ETJ, стр. 78, № 3, 1937.
5. F. Kock. Eine Abänderung der Brannschen Röhre zur direkten Darstellung von Wechselstromkurven. Phys. Z., Bd. 15, S. 840, 1914.
6. P. Induni. Über einige neuere Konstruktionen und Entwicklungsarbeiten am Kaltkatodenstrahlzillographen. Bull. ASE, S. 687, № 24, 1935.
7. R. Welpton. A three-phase rotating-film cathode-ray oscilloscope. Journ. of Sc. Instr., стр. 226, № 12, 1935.
8. B. Borries. Katodenstrahlzillograph. VDI — Z., S. 1135, Bd 8, 1936.
9. Sickle, Berkey. Extinction phenomena in high voltage breaker studied with a cathode ray oscilloscope. Trans. AIEE, стр. 850, v. 52, 1933.
10. T. A. Whipple. A cathode ray oscilloscope with high-speed drum camera rotation in vacuo. J. of IEE, стр. 497, 1936.

## Графическое определение амплитуды первой гармоники тока по кривой намагничивания

А. С. ШАТАЛОВ  
Новочеркасский индустриальный институт

При рассмотрении ряда вопросов в цепях с насыщенным железом и косинусоидальном напряжении часто необходимо знать лишь только амплитуду первой гармоники тока, без учета потерь в железе.

Пусть дана кривая намагничивания, снятая при постоянном токе. Построим ее в относительных единицах, отложив по оси абсцисс  $\Phi_{\max} = 1$  и по оси ординат  $I_{\max} = 1$  (кривая ОГБ). Для косинусоидально меняющегося напряжения поток изменяется по синусоиде  $\Phi = \Phi_{\max} \sin \omega t = 1 \cdot \sin \omega t$ . Следовательно, та же кривая ОГБ является изображением функции  $i = f(\sin \omega t)$ . Для получения зависимости  $i = f(\cos \omega t)$  применяем следующее построение.

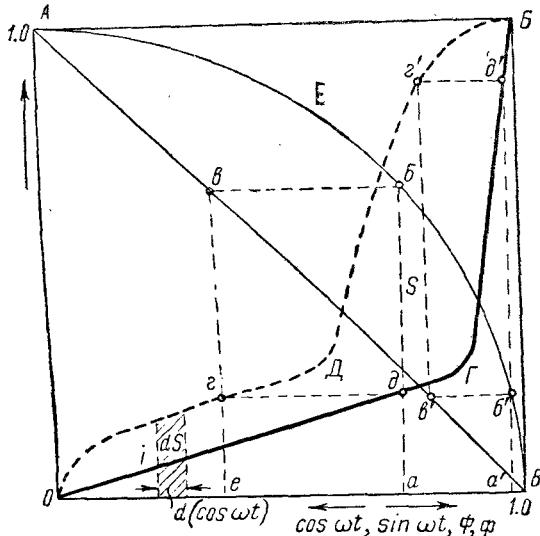


Рис. 1

Проведем диагональ квадрата  $AB$  и построим четверть окружности  $AEB$ . Тогда для произвольной точки  $a$  на оси  $OB$  отрезок  $Oa = \sin \omega t_1$ , а длина отрезка вертикали, проведенной из точки  $a$  до пересечения с окружностью в точке  $b$ ,  $ab = \cos \omega t_1$ .

Проведем из точки  $b$  горизонталь до пересечения с диагональю  $AB$  в точке  $e$  и опустим из этой точки перпендикуляр  $be$  на ось  $OB$ . Тогда  $eb = ab = \cos \omega t_1$ .

На полученной вертикали  $be$  откладываем значение тока  $i_1$ , соответствующее углу  $\omega t_1$ , т. е. отрезок  $ge = da$ .

Проделав аналогичные построения для других точек (например  $a'$ ,  $b'$ ,  $b'$ ,  $d'$ ), построим кривую  $O\bar{D}B - i = \phi(\cos \omega t)$ .

Определим площадь, заключенную между кривой  $O\bar{D}B$  и осями  $OB$  и  $BB'$ .

Элементарная площадка  $dS = id(\cos \omega t)$ .

$$\text{Вся площадь } S = \int_1^0 id(\cos \omega t) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} i \sin \omega t d\omega t.$$

Для кривой, симметричной относительно вертикальной и горизонтальной осей, первая гармоника обычно определяется по формуле:

$$I_{m1} = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} y \sin \omega t d\omega t.$$

Следовательно,  $I_{m1} = \frac{4S}{\pi}$ .

## Определение постоянной времени экспоненциальной функции при неизвестных начальном и конечном ее значениях

Инж. В. Н. ЛЕБЕДЕВ  
Днепроэнерго

При обработке осциллограмм часто приходится определять постоянную времени функции вида

$$u = u_\infty + (u_0 - u_\infty)e^{-\frac{t}{T}} \quad (1)$$

при неизвестных начальном  $u_0$  и конечном  $u_\infty$  значениях. В таком случае можно рекомендовать следующий прием.

По данным осциллограммы строится в большом масштабе кривая  $u = f(t)$ . Из кривой берем значения  $u$ ,  $u_{n+1}$  и  $u_{n+2}$  для трех последовательных моментов времени  $-t_n$ ,  $t_{n+1} = t_n + \Delta t$  и  $t_{n+2} = t_n + 2\Delta t$ . Промежуток времени  $\Delta t$  выбирается примерно в 5–10 раз меньший предполагаемой постоянной времени.

Пользуясь (1), можно составить такое выражение, связывающее  $u_n$ ,  $u_{n+1}$  и  $u_{n+2}$ :

$$\frac{u_n - u_{n+2}}{u_n - u_{n+1}} = \frac{1 - e^{-2\frac{\Delta t}{T}}}{1 - e^{-\frac{\Delta t}{T}}} \quad (2)$$

Положив

$$\frac{u_n + u_{n+2}}{u_n - u_{n+1}} = a \text{ и } e^{-\frac{\Delta t}{T}} = x,$$

получим

$$a = \frac{1 - x^2}{1 - x}. \quad (3)$$

Решая квадратное уравнение (2), получим:

$$x = a - 1, x_2 = 1.$$

Используем лишь первый корень, тогда  $a - 1 = e^{-\frac{\Delta t}{T}}$  (4).

Решив (4) относительно  $T$  и переходя к десятичным логарифмам, окончательно получим:

$$T = \frac{\Delta t}{2,302 [\lg 10 (a - 1) - 1]}. \quad (5)$$

Величину  $a$  надо вычислить для ряда точек кривой, взять среднее и по (5) вычислить  $T$ .

# Юбилейные дни журнала „Электричество“ в 1940 г.

В октябре—ноябре 1940 г. отмечалось 60-летие журнала «Электричество».

— В связи с 60-летием журнала «Электричество» Совнарком Союза ССР дал указание Наркомату электростанций СССР и Наркомату электропромышленности СССР о премировании старейших и лучших работников журнала. Специально изданным приказом обоих наркоматов (от 31 октября 1940 г. за № 218/а—111/а), в котором были отмечены 60-летие журнала «Электричество» и его заслуги в деле развития электротехнической науки в стране, а также в деле подготовки и воспитания кадров электростанций и электропромышленности, была объявлена благодарность старейшим и лучшим работникам журнала и были премированы денежной премией: член-корреспондент Академии наук СССР М. А. Шателен, академик В. Ф. Миткевич, академик К. И. Шенфер, академик В. С. Кулебакин, академик В. М. Хрущев, ответственный редактор журнала «Электричество» инж. Я. А. Климовицкий, члены-корреспонденты Академии наук СССР В. И. Вейц, К. А. Круг, И. С. Брук, М. П. Костенко, д-р техн. наук, проф. П. Л. Калантаров, д-р техн. наук, проф. В. К. Попов, канд. техн. наук, доц. Э. А. Meerovich, д-р техн. наук И. С. Стекольников, проф. В. Н. Степанов, д-р техн. наук, проф. Ю. В. Буткевич, проф. С. О. Майзель, д-р техн. наук, проф. Г. Н. Петров, д-р техн. наук Л. И. Гутенмакер, П. И. Воеводин (составивший отв. редактором журнала «Электричество» с 1922 г. по 1931 г.), М. И. Радовский, инж. Р. А. Лютер ( завод «Электросила» им. Кирова), инж. Л. М. Шницер (Трансформаторный завод им. Куйбышева), инж. Р. Л. Райнес (Мосэнерго), инж. И. И. Ратгауз (редактор), пом. отв. редактора М. Г. Башкова, техн. редактор С. К. Курапов, зав. производственной частью Госэнергоиздата И. М. Скворцов, машинистка С. В. Баландина.

В своем приказе Наркомат электростанций и Наркомат электропромышленности призвали работников журнала «Электричество» работать и дальше над развитием советской электротехнической науки для дела укрепления оборонной и хозяйствственно-политической мощи Советского Союза.

— Редакции журнала «Электричество» прислали приветствия: Президиум Академии наук СССР, Народный Комиссар электростанций СССР А. И. Летков, Народный Комиссар электропромышленности СССР В. В. Богатырев, Всесоюзное Научное инженерно-техническое общество энергетики и электросвязи, Московское отделение общества энергетики и электросвязи, Энергетический институт им. Кржижановского Академии наук СССР, Электромеханический факультет Ленинградского политехнического института им. Калинина, редакции журналов «Электрические станции», «Вестник электропромышленности», «Электромонтер» и «Теплосиловое хозяйство», комиссия истории техники и естествознания Академии наук СССР, коллектив работников Научно-исследовательского института связи, СЦБ и электрификации НКПС, дирекция, горномеханический факультет и коллектива работников кафедр горной электротехники, электротехники и электромашин Московского горного института им. Сталина, Лаборатория электромагнетизма им. Маковелла Московского государственного института им. Ломоносова, Лаборатория ртутных преобразователей Ленинградского политехнического института им. Калинина, дирекция и кафедра электротехники Ленинградской лесотехнической Академии, НИТОЭ Ленинградского завода «Электроаппарат», НИТОЭ завода «Уралэлектромашина» и др.

Журналу «Электричество» также прислали приветствия и пожелания многие ученые и инженеры: член-корреспондент Академии наук СССР М. А. Шателен, М. М. Айхингер (составившая секретарем редакции с 1922 по 1931 гг.), академик В. Ф. Миткевич, академик В. М. Хрущев, член-

корреспондент Академии наук СССР М. П. Костенко, член-корреспондент Академии наук СССР В. К. Аркадьев д-р техн. наук Л. Е. Машкиллесон, д-р техн. наук проф. В. К. Попов, д-р техн. наук, проф. О. Б. Бров проф. М. Н. Левицкий, д-р техн. наук, проф. Б. Е. Воробьев д-р техн. наук, проф. А. М. Бамдаас, канд. техн. наук, доц. Л. В. Гладилин, доц. Б. М. Шляпашников, проф. М. Д. Каменский, д-р техн.-экон. наук С. А. Кукель-Краевский, д-р техн. наук, проф. Р. Л. Аронов, д-р техн. наук, проф. А. А. Воробьев, инж. П. А. Фридкин, инж. Л. М. Клячкин, проф. С. М. Брагин, д-р техн. наук И. С. Стекольников, канд. техн. наук, доц. Э. А. Meerovich, инж. Г. Б. Холивский, инж. Е. В. Калинин, инж. Л. М. Шницер, инж. М. Г. Лозинский, инж. М. М. Акодис, канд. техн. наук, доц. В. А. Привезенцев, канд. техн. наук, доц. В. А. Соловьев, инж. С. А. Кантер, инж. Б. Л. Айзенберг, инж. М. Н. Карасик, канд. техн. наук М. И. Земляной, канд. техн. наук Г. И. Атабеков, доц. Г. Б. Меркин, канд. техн. наук В. Т. Ренне, инж. Б. И. Филиппович, инж. М. Д. Трейвас, инж. Н. А. Шостын, инж. С. А. Гинзбург, канд. техн. наук А. П. Беляков, инж. Ю. А. Сабинин, инж. В. Н. Коновалов и др.

— Президиум Академии наук СССР для ознаменования 60-летия журнала «Электричество» образовал 22 октября 1940 г. Юбилейный комитет в составе: академика В. П. Никитина (председатель), члена-корреспондента Академии наук СССР М. А. Шателена, академика В. Ф. Миткевича, академика Г. М. Кржижановского, академика К. И. Шенфера академика В. С. Кулебакина, зам. Наркома электростанций СССР П. М. Сергиенко, зам. Наркома электропромышленности СССР А. И. Товстопалова и др.

— 23 ноября 1940 г. в Московском Доме ученых Академии наук СССР состоялось торжественное заседание с участием широкой научной электротехнической общественности, посвященное 60-летию журнала «Электричество». В почетном президиуме торжественного заседания было избрано Политбюро Центрального Комитета ВКП(б) и были посланы при ветствия товарищам И. В. Сталину и В. М. Молотову.

В президиум торжественного заседания были избраны заместитель председателя Совнаркома Союза ССР, председатель Совета по топливу и электрохозяйству при Совнаркоме СССР М. Г. Первухин, президент Академии наук Союза ССР В. Л. Комаров, вице-президент Академии наук Союза ССР О. Ю. Шмидт, Народный Комиссар электростанций Союза ССР А. И. Летков, Народный комиссар электропромышленности Союза ССР В. В. Богатырев, академик-секретарь Отделения технических наук Академии наук Союза ССР В. П. Никитин, член-корреспондент Академии наук Союза ССР, председатель Всесоюзного научного инженерно-технического общества энергетиков М. А. Шателен, академик В. Ф. Миткевич, академик Г. М. Кржижановский, академик К. И. Шенфер, академик В. С. Кулебакин, член-корреспондент Академии наук Союза ССР К. А. Круг, член-корреспондент Академии наук Союза ССР В. И. Вейц, член-корреспондент Академии наук Союза ССР И. С. Брук, ответственный редактор журнала «Электричество» инж. Я. А. Климовицкий, секретарь Президиума Академии наук Союза ССР инж. П. А. Светлов, д-р техн. наук, проф. Г. Н. Петров, д-р техн. наук, председатель Московского научного инженерно-технического общества энергетиков проф. Ю. В. Буткевич, зам. директора Энергетического института Академии наук Союза ССР проф. Б. А. Телешев, директор Госэнергоиздата Д. В. Калантаров, П. И. Воеводин, инж. Л. М. Шницер, инж. Ф. Я. Гольдберг, инж. Г. И. Бабат.

Торжественное заседание было открыто вступительным словом от Президиума Академии наук СССР академика В. П. Никитина. С приветствиями выступили: от Всесоюзного

научного инженерно-технического общества энергетики и электросвязи д-р техн. наук, проф. Ю. В. Буткевич, от Энергетического института им. Кржижановского Академии Наук СССР проф. Б. А. Телешев, от инженерно-технических работников Трансформаторного завода им. Куйбышева Э. А. Манькин. С докладами выступили: академик В. Ф. Миткевич — «Воспоминания старого сотрудника журнала «Электричество», член-корреспондент Академии Наук СССР М. А. Шателен — «Электричество в первые годы реализации ленинско-сталинского плана ГОЭЛРО», отв. редактор журнала «Электричество» инж. Я. А. Климовицкий — «К шестидесятилетию журнала «Электричество».

В заключение состоялся концерт, в котором приняли участие Народный артист СССР В. И. Качалов, Народный артист СССР И. С. Козловский, Народная артистка СССР А. К. Тарасова, Народный артист СССР Н. П. Хмелев, Народный артист РСФСР М. И. Прудкин, лауреат международного и всесоюзного конкурса скрипачей Д. Ф. Ойстрах, лауреат международного конкурса пианистов Я. В. Флиер, солистка Московской Госфилармонии Д. Я. Пантофель-Нечецкая и др.

В Московском Доме ученых была организована 23 ноября 1940 г. выставка, посвященная 60-летию журнала «Электричество».

— 21 ноября 1940 г. в 19 ч. 45 м. по радиостанции РВ-84 состоялось выступление академика В. П. Никитина, посвященное 60-летию журнала «Электричество».

— Газеты «Известия Советов Депутатов трудящихся» (21 ноября 1940 г.) и «Электропромышленность» (22 ноября 1940 г.) поместили статьи, посвященные юбилею журнала «Электричество».

— В ноябре 1940 г. был выпущен юбилейный номер журнала «Электричество», в котором приняли участие своими статьями: академики А. Ф. Иоффе, В. Ф. Миткевич, В. П. Никитин, В. М. Хрушев, В. С. Кулебакин в соавторстве с А. В. Храмым, члены-корреспонденты Академии Наук СССР М. А. Шателен, В. К. Аркадьев, В. П. Вологдин, д-р техн. наук И. С. Стекольников, К. К. Попов и М. И. Радовский, инженеры Г. И. Бабат, Е. Г. Комар, П. А. Светлов, Н. В. Панков, Ю. М. Галонен и др.

## 15 лет Шатурской грэс им. Ленина

Доц. И. М. БУДНИЦКИЙ

Комиссия по истории техники и естествознания Академии Наук СССР

История социалистического строительства в нашей стране полна красочных эпизодов. Одной из наиболее ярких страниц борьбы советского народа за создание новой, социалистической техники является история Шатурской грэс им. Ленина. Шатура — это крупная победа рабочего класса в овладении новой, высокой техникой. Шатура — это одна из наиболее замечательных страниц борьбы и побед ленинско-сталинской электрификации нашей страны.

До Октября Шатурский район представлял собою одно из самых заброшенных и отсталых в экономическом отношении мест центральной России. Богатейшие залежи торфа в Шатурском районе, как и во всей стране, почти совершенно не использовались.

Началом нового этапа в хозяйственной и культурной жизни района явилось специальное указание В. И. Ленина в ноябре 1917 г. из Смольного: развивать шатурские торфо-разработки. В 1918 г. было признано необходимым соорудить Шатурскую электростанцию. Тогда же началась подготовка Шатурского болота к добыче торфа, постройка поселка и т. п. В августе 1919 г., когда наша страна, окружена на кольцом интервентов, переживала глубокую хозяйственную разруху, на базе шатурских торфяных массивов было приступлено к постройке временной электростанции. Эта станция состояла из одного турбогенератора завода Эрликон мощностью в 5 тыс. kW, который предоставил Путиловский завод, 1 котельного агрегата Ярроу 500-m<sup>2</sup> поверхности нагрева, снятого со старого военного судна, и повышительной подстанции в 6,2/32,1 kV. Она начала работать в июле 1920 г.

Несмотря на небольшую мощность, Шатурская станция имела в условиях того периода большое значение. Об этом свидетельствует тот факт, что В. И. Ленин в своем докладе «О внутренней и внешней политике Республики» на IX Все-российском Съезде Советов (23 декабря 1921 г.) специально отметил открытие «Шатурки».

Однако станция не могла дальше расширяться. Причиной этого являлось то обстоятельство, что практика сжигания торфа в промышленном масштабе не дала еще нужного решения. Но летом 1921 г. стало известно об успешных опы-

тах по сжиганию торфа на Ленинградской трамвайной станции в шахтоцепных топках, сконструированных инж. Т. Ф. Макарьевым.

Результаты эксплоатации этих топок превзошли все ожидания и заставили многих признанных технических авторитетов радикально изменить свою точку зрения на торф как базу для электрификации.

В декабре 1922 г. правительство ассигнуовало средства для постройки первой очереди станции; в июне 1923 г. началось сооружение Шатурской грэс. Это строительство пользовалось неослабным вниманием со стороны В. И. Ленина. Именно поэтому и благодаря героической работе коллектива Шатурского темпы постройки станции были исключительно высокими. 23 сентября 1925 г. Шатурская грэс дала первый ток от первой машины. 13 октября была пущена вторая машина. 6 декабря состоялось официальное открытие Шатурской станции. «Шатурка» — первенец и любимое детище социалистической электрификации — вступила в строй действующих предприятий. Это была победа советских рабочих и специалистов, впервые в мировой технике решивших сложную задачу сжигания торфа в промышленном масштабе.

Опираясь на богатейший опыт строительства и эксплоатации Шатурской грэс, страна приступила к постройке ряда станций. Вслед за ленинской Шатурой выросли новые, мощные торфяные станции — энергетические базы сталинской индустриализации страны.

Это — Горьковская грэс, «Красный Октябрь», Ивановская грэс, Дубровская грэс и другие.

Из года в год Шатургрэс им. Ленина увеличивала выработку электроэнергии. За пятнадцать лет своей работы ленинская Шатура дала народному хозяйству СССР почти 14 млрд. kWh электроэнергии, что в семь раз превышает ежегодную выработку всех электростанций России накануне империалистической войны.

Крупное государственное и хозяйственное значение Шатуры становится еще более убедительным, если добавить, что ее работа за истекшие пятнадцать лет принесла стране экономию около 9 млн. t высокооцененного каменноугольного топлива. Весьма характерно, что значительный рост выработки

Электроэнергии, начиная с 1934 г., шел не за счет введения новой мощности, а исключительно благодаря непрерывному росту производительности труда и лучшему использованию оборудования.

Имя Шатуры заслуженно пользуется популярностью в нашей стране. Это объясняется не только значительной мощностью самой станции, но и той крупной исторической ролью, которую она сыграла в решении такой важной задачи нашей технической политики, как рациональное сжигание торфа в крупном промышленном масштабе.

Добившись серьезных успехов в использовании торфа, коллектив Шатургэс открыл пути широкому применению торфа как топлива. Неисчерпаемые запасы этого основного вида местного топлива тем самым были включены в общий топливный баланс народного хозяйства СССР.

История Шатуры есть история борьбы за высокую культуру сжигания торфа, и на этом пути коллективу станции пришлось преодолеть не мало трудностей, решая каждый раз все новые технические задачи. С работы на машинно-формоочном торфе станция в 1928 г. начинает переходить на гидроторф. В 1930 г. встает новая задача: освоить сжигание фрезерного торфа. Все эти задачи коллектив станции решает по-большевистски.

Наряду с ростом мощности и выработки электроэнергииросли на Шатуре и люди, овладевшие сложной энергетической техникой.

Рост людей — это, пожалуй, самое замечательное в истории развития Шатурской грэс. Многие кочегары, слесари, монтеры, турбинные машинисты, мастера прошли здесь серьезнейшую политическую и производственную школу. Придя на Шатуру зачастую из деревни, без всякой специальности, малограмотными, они стали высококвалифицированными рабочими, управляющими сложнейшими механизмами и агрегатами.

Особенно интересно отметить широко развернувшееся техническое творчество рабочих и инженерно-технических работников Шатуры. Только за последние 8 лет от рационализаторов электростанции поступило 6704 предложения, принято более 3000 предложений, внедрение которых дает ежегодно около 2,5 млн. руб. экономии.

Отметим лишь несколько интересных рационализаторских мероприятий, проведенных за последние два года. Например, ремонт больших машин с перемоткой роторов завод «Элек-

тросила» брался выполнять за 90 дней. Не имея возможности останавливать машины на столь длительный срок, станция выполнила своими силами эту серьезную работу за 30 дней. Этот блестящий результат был достигнут благодаря хорошей организации труда и развитию стахановского движения.

Другой пример: силами коллектива Шатуры были запроектированы, изготовлены и смонтированы на 9 котлах водяные экономайзеры, что дает ежегодную экономию свыше 1 млн. руб. Эти экономайзеры представляют собою оригинальную конструкцию и разработаны для местных условий.

Ярким примером роста людей на Шатуре может служить путь т. М. И. Наумова — от слесаря в 1924 г. — до директора электростанции в настоящее время. Тов. М. И. Наумов — орденоносец, избран депутатом Верховного Совета РСФСР. Другой пример: т. Е. С. Иванов, начавший свою работу в 1928 г. с должности дежурного теплотехника, сейчас — главный инженер станции. Этот талантливый советский специалист за свою выдающуюся работу награжден орденом «Знак Почета». Тов. М. И. Кирсанов — старший машинист — награжден орденом Ленина.

Лучшие люди Шатуры — Самсин, Лобов, Назаров, Кабанов — награждены медалями.

За последнее время Шатура несколько ухудшила свои эксплуатационные показатели. Это объясняется тем, что Шатурский торфотрест не выполняет систематически свою производственную программу и вынуждает станцию сжигать также и подмосковный уголь, что отрицательно оказывается на показателях эксплуатации.

Перед коллективом работников Шатуры стоят в этом году серьезные задачи. Прежде всего — бесперебойно снабжать электроэнергией народное хозяйство Московской орденоносной области. Необходимо в дальнейшем повысить экономическость работы. Это означает практически сокращение расхода электроэнергии на собственные нужды и сокращение удельных расходов топлива на выработанный киловаттчас. Необходимо добиться полной ликвидации аварийности вне зависимости от причин, ее вызывающих.

Пятнадцать лет работы ленинской Шатуры — это цели этап в борьбе за социалистическую индустриализацию, и претворение в жизнь указаний Ленина и Сталина об электрификации всей страны.

## Роль сельской электрификации в военном хозяйстве капиталистических стран \*

Канд. экон. наук З. И. РАКОШИ

Энергетический институт Академии Наук СССР

Опыт первой мировой империалистической войны заставил правительства капиталистических стран серьезно поставить вопрос о подготовке сельских районов к войне. Новая военная техника и стратегия, превращающие «тыл» в настоящий фронт, придали сельским районам особое военнохозяйственное значение.

В значительной степени этим можно объяснить, что еще в период первой войны в некоторых странах были разработаны планы электрификации, впоследствии систематически проводимые за счет государственных субсидий и муниципальных бюджетов.

В Германии в 1933 г. электрификация сел в основном была завершена. Примеру Германии последовала и Франция, затратившая за последние 10 лет около 6 млрд. франков на электрификацию сельских районов. По этому пути пошла и Италия. К началу второй империалистической войны в этих трех странах присоединение сельских районов к сетям электроснабжающих систем было в основном закончено.

Электрификация сельских районов в западно-европейских странах была облегчена высоким уровнем индустриализации и значительной плотностью населения сельских районов, а также льготными условиями финансирования, обеспечиваемого долгосрочным госкредитом. Значительно сложнее обстояло дело в преобладающей части сельских районов США, редко населенных, с разбросанными на большой территории фермами. До 1935 г. лишь сельские районы промышленных штатов были охвачены электроснабжением, но даже в этих районах, за исключением орошаемых районов Калифорнии, электрификация ферм не превышала 30%, в сельских же штатах центрального Севера и Юга только несколько процентов ферм были электрифицированы.

В 1935 г. правительство Рузвельта организовало «Федеральное управление сельской электрификации» (REA), привязанное в десятилетний срок электрифицировать 50% ферм. На первые пять лет работы Управления Конгресс утвердил кредиты в сумме 270 млн. долл. С этого момента началась широкая развернутая пропаганда сельской электрификации.

В июльском номере журнала Управления за 1940 г. «Rural Electrification News» напечатана выдержка из речи министра земледелия США Генри Уэллес, высказывающего истинные цели сельской электрификации: «REA (Управление), свыше 600 электрооператоров и другие электроснабжающие системы 45 штатов, работающие по программе Управления, тесно с联络ятся вокруг национальной программы обороны и предоставляют для нее все свои средства».

...«Одним из важнейших средств являются передвижные, установленные на тракторах, электрические станции, которые Управление помогло создать и которые по истечении нескольких часов, потребных для приведения их в готовности, могут быть в любом месте использованы как военный энергетический источник».

«Другое достижение Управления, — говорит Уэллес, — состоит в создании широко развитых электрических систем в сельских районах, готовых обеспечить в случае нужды рассредоточение оборонной промышленности. Наличие подобных энергетических источников, способных обеспечить важные средства связи, обучение молодежи обращению с механическим и электрическим оборудованием, соответственно программе национальной обороны, в значительной степени усиливает оборонную мощь страны»<sup>1</sup>.

В журнале «Electrical World» от 3 августа 1940 г. сообщается о переговорах Управления с представителями электропромышленников о выполнении заказов на электрооборудование для сельской электрификации на сумму 100 млн. долларов, ассигнованную Конгрессом на 1940—1941 бюджет-

ный год на нужды сельской электрификации. О масштабе строительства в 1940—1941 гг. можно судить по тому, что за пять лет существования Управления им были выданы кредиты на строительство сельских линий в сумме 273 млн. долл. На эту сумму было выстроено 250 тыс. км линий и присоединены 300 тыс. ферм. Сейчас за один год намечается соорудить сельские линии протяженностью в 150 тыс. км и электрифицировать 300 тыс. ферм. Выполнение этих работ требует 320 тыс. км провода, 230 тыс. трансформаторов и 1 850 000 столбов<sup>2</sup>.

Подобный размах электростроительства в сельских районах в период разгаря военной горяччи в США, когда крупные фонды металлов и электроматериалов расходуются на стратегические нужды, объясняется военно-хозяйственным значением сельской электрификации.

Слаттери в *Rural Electrification News* отмечает важнейшее военное значение сельской электрификации.

Больше одного миллиона ферм, — пишет Слаттери, — электрифицированы с 1935 г. Электрические сети обслуживают не только фермы, но и ряд других предприятий. К существующим сетям можно присоединить сотни тысяч других ферм и предприятий. Сельские линии обслуживают жизненно важную связь, в том числе маяки воздушных путей, радиомачты и пр., делаю возможным работу телефона, телеграфа, гражданского и военного радиовещания во многих новых районах. Сельская электрификация создала энергетическую базу, позволяющую децентризовать определенные отрасли промышленности, если в этом возникнет необходимость. Сельские электросистемы менее уязвимы в военном отношении.

Включение сельских сетей в мобилизационный план США требовало солидной организационной подготовки сельского электростроительства. За последние месяцы Управление строило за каждый рабочий день в среднем 650 км сельских линий среднего и низкого напряжений.

В целях снижения стоимости строительства Управлением были организованы работы по стандартизации и массовому производству линейного оборудования и деталей внутренней проводки, а также по внедрению заменителей, главным образом из пластмасс, в сельское оборудование. Стоимость присоединения одного абонента снизилась со 100 до 40 долл.

Удешевление электростроительства и снижение тарифов служили важными предпосылками. Но не менее важным фактором сельской электрификации оказалась система кредитования. Тяжелое финансовое положение фермеров за последние 10 лет было главным тормозом электрификации ферм, требующей от 800 до 1000 долл. наличных денег для присоединения фермы к сетям. Управление представляет фермерам долгосрочные кредиты на льготных условиях, при которых достаточно 200—300 долл. наличными для электрификации фермы.

В целях надежной организации кредитования и устранения использования кредитов для спекулятивных целей электрокомпаниями кредиты даются преимущественно электрооператорам, колективно несущим финансовую ответственность за линию. Кооператив охватывает будущих абонентов, одного или нескольких населенных мест или целого административного района. Проекты электрификации представляются кооперативами в Центральное бюро Управления, проверяющее рентабельность. Низшим лимитом протяженности линий, финансируемых Управлением, считаются 40 км с 50—100 потребителями.

Электрооператор не только несет финансовую ответственность за линии, но и за их правильную эксплуатацию. По погашению кредита линия переходит в полную собственность кооператива. Таким путем правительство полностью получает обратно средства, израсходованные на строительство сельских сетей, которые оно рассматривает как свою маневренную энергетическую базу для военных и военно-

\* Извлечение из материалов, разработанных автором в отделе общей энергетики Энергетического института Академии Наук СССР по проблеме научных основ энергетики сельских районов.

<sup>1</sup> *Rural Electrification News*, July, 1940.

<sup>2</sup> *Electrical World*, 3 August, 1940.

хозяйственных целей. Можно с уверенностью предполагать, что в случае нужды фермеров отключат от «своих» линий в пользу более важных для войны потребителей.

Сравнительно незначительная часть кредитов отпускается Управлением на строительство местных станций мощностью от 100 до нескольких тыс. квт. В большинстве случаев сельские линии присоединяются к мелким или средним существующим муниципальным системам или к более крупным районным сетям электроснабжающих компаний. Небольшие генерирующие установки строятся коммунальными хозяйствами мелких городов за счет муниципальных средств, впоследствии эти установки используются для электрификации окружающих ферм.

Электрификация ферм при помощи госкредитов по сути представляет собой новую форму закабаления значительной массы фермеров банками и прикрепления их к земле. Достаточно фермеру пропустить очередной взнос по погашению кредита, чтобы потерять все вложенные в электрификацию деньги. Мобилизованный в армию фермер должен не только жертвовать своей жизнью и для увеличения барыша эксплоататоров, но и оставить за себя на ферме «заменителя» в виде электрического двигателя, который обеспечит добавочную эксплуатацию членов его семьи.

Среди империалистических держав наиболее отсталая в области сельской электрификации, как и в других областях подготовки к войне, Англия. К началу военных действий были электрифицированы в Англии лишь 10% ферм, главным образом пригородных. Ныне английское сельское хозяйство, лишенное значительной части мужской рабочей силы, с трудом справляется с задачей перестройки на военный лад. Электрификация ферм стала одной из важнейших проблем военной экономики Англии.

В передовой журнала Electrical Review (январь, 1940), посвященной вопросу «Развития электрификации в военное время», выдвигались три задачи электрификации, требующие немедленного решения. Первой по важности задачей журнал называет сельскую электрификацию, второй — электрификацию городского транспорта и в качестве третьей регулирование осветительной нагрузки.

Потребность в быстром росте сельскохозяйственной продукции в условиях нехватки рабочей силы, — писал журнал, — требует особых серьезных и проверенных мер. Это признается и комиссарами по электрификации, которые отменили обычные ограничения капиталовложений в тех случаях, когда речь идет о расширении сельских сетей<sup>3</sup>.

В этом же номере журнала в небольшом отчете о деятельности «Британской Ассоциации по поощрению электрификации» за время военных действий говорится:

«Главным полем деятельности Ассоциации и ее филиалов была сельская электрификация. Среди основных вопросов, разработанных Ассоциацией, фигурирует национальный проект электроснабжения всех ферм страны».

В Германии и во Франции, где централизованное электроснабжение сельских районов к началу военных действий в основном было завершено, вопросы электростроительства и электроснабжения сел отступили на второй план перед вопросами использования существующих электроустановок и приемников тока в сельском хозяйстве. Однако германские власти продолжают заниматься вопросом электрификации неэлектрифицированных пока крестьянских хозяйств, составляющих всего 18% всех хозяйств Германии, Австрии и вновь присоединенных территорий Восточной Пруссии и б. Чехо-Словакии<sup>4</sup>.

На какие нужды используется электроэнергия в селах в военное время? На этот вопрос вся специальная литература дает стереотипный ответ — на производственные нужды.

Бывшая электрификация, которая раньше являлась основным фактором электрификации сельских районов, играет сейчас подчиненную роль.

Один из руководителей германской шеффской организации для поощрения техники сельского хозяйства — Кинд опубликовал в ETZ статью «Электротехнические задачи в сельском хозяйстве». Кинд указывает, что небольшой масштаб крестьянских хозяйств сильно ограничивает использование электроэнергии в сельском хозяйстве (до нескольких процентов от возможного потребления). Освещение в сель-

хозяйственном производстве играет подчиненную роль, так как преобладающая часть работ выполняется днем. Главное внимание должно быть сейчас уделено лучшему использованию электродвигателей, которых насчитывается в германском сельском хозяйстве полтора миллиона. До сего времени двигатели потребляли около 300 млн. kWh в год, что равносильно эффекту увеличения рабочего дня работника в сельском хозяйстве в среднем лишь на один час в сутки. Кинд рекомендует более широко применять на фермах электрические машины (в первую очередь — доильные машины, запарники, универсальные дробилки, электромолотильные установки), а также электроорошение и электрические ограды<sup>5</sup>. Электроэнергия в первую очередь должна быть использована для электрификации животноводства.

В этом же смысле высказывается известный английский специалист в области сельскохозяйственной электрификации Мэтюз в сообщении о состоянии электрификации английских ферм за последний год. Электричество применяется в английских сельских местностях главным образом на молочных и птицефермах. Он предлагает широко распространять электротермии для производственных нужд ферм.

Английское правительство особенно поощряет использование электрических сушильных аппаратов для получения высококачественного корма<sup>6</sup>.

В воюющих странах первостепенное значение приобрела электромолотьба. В Германии вообще запрещено использование трактора для молотьбы.

По линии электрификации быта в сельских местностях главное внимание в настоящее время уделяют внедрению простых стиральных машин, а в безлесных районах и в районах снабжения от гидростанций — распространению электротермических приборов — кипятильников, плиток и плит.

Крупное значение придают в Англии применению электроэнергии на фермах для первичной переработки сельскохозяйственных продуктов. Вследствие разрушения бомбардировкой городских мельниц, молочных заводов, заводов, изготавливающих концентрированные кормы, стало необходимо децентрализовать пищевую промышленность и перенести производственные процессы из городов в сельские местности.

На опыте электрификации сельского хозяйства в капиталистических странах в период подготовки ко второй мировой империалистической войне и во время военных действий можно сделать некоторые выводы относительно характера направления сельской электрификации в условиях военного времени.

1. Электрификация сельского хозяйства проводится не изолированно по отдельным<sup>7</sup> индивидуальным хозяйствам, а на основе централизованного электроснабжения сельских местностей районными электроснабжающими системами или малыми станциями местного значения. Подобная система электрификации позволяет создать маневренную энергетическую базу для рассредоточения промышленности, в том числе и военной.

2. Генерирующие мощности сельских систем размещены главным образом в районных центрах или в мелких городах и обслуживаются наряду с фермами и другие предприятия села.

3. Производственная нагрузка приобретает все больший удельный вес. Если до войны производственное потребление преобладающей массы ферм составило 15—20% их общего потребления, в настоящее время есть стремление снизить удельный вес бытовой нагрузки до минимума.

4. Электрификация сельских районов проходит неравномерно по всей стране: в первую очередь охватываются электрификацией районы наиболее интенсивного животноводства и птицеводства.

<sup>5</sup> ETZ, стр. 709—713, 1940.

<sup>6</sup> Electrician, стр. 59, 1940.

<sup>7</sup> Индивидуальные мелкие электростанции имеются на фермах в большом количестве лишь в зерновых районах США, в наиболее отдаленных от промышленных центров глубинных пунктах. Эти электроосветительные установки работают на нефтяных двигателях мощностью в 0,7—1,5 kW. За последний год распространяются мелкие дизельные индивидуальные установки. Но общее число индивидуальных фермерских станций как абсолютно, так и относительно сокращается.

<sup>3</sup> Electrical Review, 12 January, стр. 48, 1940.

<sup>4</sup> Elektrizitätsverwertung, № 11—12, 1939/1940.

# БИБЛИОГРАФИЯ

## КНИГА ПО ТЕОРИИ ПЕРЕМЕННЫХ ТОКОВ

**КАЛАНТАРОВ П. Л. Теория переменных токов<sup>1</sup>.** Утв. Всес. комитетом по делам высшей школы при СНК СССР в качестве учебника для энергетических и электротехнических вузов и факультетов. Л.—М. Гос. энергетическое изд. 1940, 411 стр., 396 рис., 7000 экз., ц. 10 р. 50 к.

Рассматриваемое второе издание этой книги является первой частью учебника по теоретическим основам электротехники; вторую часть составит книга Л. Р. Неймана «Физические основы электротехники».

По сравнению с первым изданием, вышедшим в 1934 г., книга пополнилась целым рядом новых глав; однако объем ее почти не изменился благодаря переработке всего текста и исключению некоторых второстепенных вопросов.

Книга разбита на 18 глав. Первые две главы посвящены рассмотрению основных характеристик процессов, происходящих в цепях переменного тока, и последовательному и параллельному соединению этих цепей. В третьей главе излагается символический метод; в четвертой главе — процессы в индуктивно связанных цепях.

Во вновь введенных главах — пятой, шестой и седьмой — рассматриваются резонанс в связанных цепях, общие методы расчета сложных цепей, четырехполюсники и цепные схемы.

В этих главах обращает на себя внимание чрезвычайно изящное обоснование метода наложения, непосредственно вытекающее из решения с помощью детерминантов системы уравнений, написанных по методу контурных токов, а также впервые появляющееся в русской учебной литературе рассмотрение общего случая преобразования многолучевой звезды в многоугольник с диагоналями.

Восьмая глава посвящена многофазным цепям, причем целый ряд параграфов подвергся радикальной переработке. Вращающееся магнитное поле и метод симметричных составляющих выделены при этом в самостоятельные главы (13 и 14). К сожалению, эти главы не расположены непосредственно за главой о многообразных цепях, с которой они тесно связаны по существу, а отделены от нее четырьмя главами, не имеющими прямого отношения к многофазным цепям.

В девятой главе рассматриваются несинусоидальные э. д. с. и токи, в десятой — токи Фуко и поверхностный эффект, в одиннадцатой — цепи переменного тока с железом и статические трансформаторы частоты, в двенадцатой — трансформаторы с железным сердечником.

В пятнадцатой главе автор возвращается к исследованию установившихся синусоидальных токов в однофазной цепи без железа и в 23 параграфах (на 38 страницах) излагает ряд вопросов, связанных с применением линейных и круговых диаграмм. Нам представляется, во-первых, что едва ли есть надобность в столь подробном изложении этой главы, во-вторых, что этой главой должен был бы заканчиваться комплекс глав, посвященных однофазной цепи, т. е. что она должна была бы стоять вслед за главой о четырехполюсниках и цепных схемах.

Шестнадцатая глава посвящена переходным режимам в цепях с сосредоточенными параметрами. Эта глава пополнилась изложением операторного метода Хевисайда, причем впервые в учебнике по основам электротехники автор использует введенное Ван-дер-Полем понимание операторного выражения, как изображения данной функции времени.

Последние две главы введены автором вновь и трактуют об установившемся и переходном режимах однородной линии с распределенными постоянными.

Книга написана прекрасным языком, просто и ясно и потому очень легко читается. С этой точки зрения она является лучшей из всех существующих на русском языке книг по теории переменных токов. Тем не менее она обладает и некоторыми недостатками. К ним принадлежат, во-первых, уже указанные недостатки расположения. Во-вторых, некоторые вопросы в книге или совсем не освещены или освещены недостаточно. Мы имеем в виду следующее.

При рассмотрении методов расчета сложных цепей даже не упоминается о методе узлового изображения, а между тем для цепей с двумя узлами — это наиболее эффективный метод, быстрее всего приводящий к цели. Автор, правда, не называя, пользуется им при изложении вопроса о неравно-

мерной нагрузке трехфазной системы, но было бы правильнее дать его как общий метод расчета цепей с двумя узлами.

Совершенно не затронут вопрос о реактивной мощности несинусоидальных токов, не говоря уже о мощности искалечения. Хотелось бы видеть в учебнике изложение этого вопроса как по Будеску, так и по Фризе.

О реактивной мощности трехфазной цепи упоминается лишь вскользь и то только в главе, посвященной методу симметрических составляющих; при этом считается как бы известным, что реактивная мощность трехфазной системы равна сумме реактивных мощностей отдельных фаз. В книге не указывается, что такая сумма в данном случае не является амплитудой скорости поступления энергии в магнитное и электрическое поле и не указывается также, каков смысл введения понятия «реактивная мощность» при таких условиях.

В главе о переходных режимах в цепях с сосредоточенными постоянными совершенно не рассмотрены переходные режимы в разветвленных цепях, в цепях с индуктивной связью и в цепях с железом. Что касается процессов, происходящих при изменении параметров цепи, то автор ограничился рассмотрением случая изменения активного сопротивления цепи с индуктивностью (классическим методом) и указанием, что использованная при этом идея замены изменения параметров введением в цепь эквивалентных э. д. с. может быть положена в основу и при применении операторного метода.

Следует отметить, что операторный метод хотя и трактуется в книге, но не приобрел в ней должного удельного веса. Он не вошел в книгу органически, а представляется скорее некоторым дополнением к «классическому» методу. Это выразилось, в частности, и в том, что из 44 страниц, занимаемых главой о переходных режимах, операторному методу отведено лишь 11, и в том, что приведенные примеры на применение теоремы расположения уже были ранее использованы для иллюстрации «классического» метода.

Следует пожалеть также о том, что в рассматриваемом учебнике не затронута теорема Диомеля, требующая очень немного места для своего изложения, а вместе с тем чрезвычайно расширяющая область применения операторного метода.

В главе о переходных режимах в однородных линиях не достает правила Петерсона, которое позволяет, очень быстро снести задачу об отражении волн к задаче на переходный режим цепи с сосредоточенными постоянными.

Включение всех указанных вопросов, конечно, потребовало бы увеличения объема книги, но мы уже указывали, что глава о линейных и круговых диаграммах (38 страниц) могла бы быть значительно сокращена.

В курсе основ электротехники спорной является также необходимость главы о трансформаторах с железным сердечником, так как трансформаторы подробно рассматриваются в курсах электрических машин. В подобном курсе по этому вопросу возможно ограничиться одним параграфом в главе о цепях с железом, где давались бы лишь понятия о процессе работы трансформатора и автотрансформатора.

В числе недостатков книги следует указать еще, что понятие «напряжение» и особенно его символ  $U$  не пользуется в книге правилами гражданства. Лишь в нескольких случаях автор заменяет термин «напряжение» термином «электродвижущая сила», но даже и в этих немногих случаях он обозначает его символом  $e$ .

Нам представляется более целесообразным различать понятия «электродвижущая сила» и «напряжение», относя первое из них к замкнутой цепи (контуру), а второе — к участку цепи между двумя точками, как это принято в большинстве электротехнических книг и зафиксировано соответствующими стандартами.

В книге есть еще ряд недостатков, связанных со структурой курса основ электротехники в Ленинградском политехническом институте, а именно с делением его на две само-

<sup>1</sup> Рецензия представлена информационно-библиографич. секция Гос. научн. библиотеки.

стоятельный части; первая — «теория переменных токов» и вторая — «физические основы электротехники».

Уже самое название второй части курса показывает, что курс должен был бы начинаться именно с этой второй части; было бы странно сначала выстроить здание, а потом подводить под него фундамент.

В теории переменных токов есть целый ряд вопросов, изложение которых должно было бы вестись на базе физических основ электротехники, что оказывается невозможным при существующей последовательности этих глав. Возникает вопрос — для чего в таком случае существует курс физических основ электротехники и в каких прикладных дисциплинах будет использован его теоретический материал?

Результатом независимого от физических основ построения курса теории переменных токов являются следующие недостатки книги.

1. Явления поверхности эффекта по своей физической сущности тесно связаны с проникновением переменного электромагнитного поля вглубь проводников, вдоль которых распространяется электромагнитная волна. Поэтому анализ явления поверхности эффекта должен был бы базироваться на уравнениях Максвелла, и это было бы одним из прекрасных примеров, иллюстрирующих значение уравнений Максвелла для электротехники. Этого в книге нет.

2. В главе об установившемся режиме однородных линий бегущие волны трактуются как два слагаемых (в математическом выражении) напряжения в произвольной точке линии, в произвольный момент времени, однако без разъяснения реальных физических процессов, которые при этом происходят в линии. В данном случае приходится сожалеть, что автор отступил от своего принципа строить изложение на физической базе и пользоваться математикой лишь как вспомогательным аппаратом.

В связи с математическим происхождением понятия волны, бегущей вперед, и волны, бегущей назад, читателю, вероятно, останется неясным, почему автор находит возможным

рассматривать «волны, бегущие назад, как результат отражения волн, бегущих вперед, от конца линии» (стр. 350).

С предыдущим связаны некоторые неясности в главе о 4-полюсных и цепных схемах; здесь впервые появляются (стр. 127) волны, бегущие вперед и назад, причем, как указывает сам автор, «смысл этих названий, заимствованных из теории однородных линий, выяснится при рассмотрении последних».

Несмотря на это, в следующей фразе автор находит возможным говорить о физическом смысле постоянной распространения. В действительности же физический смысл процесса, а значит и характеризующих его величин, не выясняется ни здесь, ни в главе об однородных линиях.

Переходные процессы в однородных линиях представляют собою по существу частный случай распространения электромагнитного поля, а именно — распространение поля вдоль проводов.

Уравнения, отражающие этот процесс, могут быть весьма просто и изящно выведены из основных уравнений Максвелла, чего в данной книге не сделано.

Приведенные примеры показывают, что изложение ряда вопросов теории переменных токов в отрыве от теории электромагнитного поля приводит к недостаточно полному освещению первых и недопользованию второй. Если автор согласится с этой точкой зрения и к следующему изданию переработает книгу в соответствующем направлении, она, несомненно, займет первое место среди существующих учебников этого рода.

Что касается внешнего оформления книги, оно в общем выполнено не плохо. Однако нельзя не упрекнуть издательство за отсутствие алфавитного указателя, за некоторую неоднородность бумаги и за слишком большое количество опечаток.

Доц. М. А. ПЕРЕКАЛИН  
Московский энергетический институт им. Молотова

## АГА САМЕД АЛИЗАДЕ. Механизм развития молний и методы ее изучения. Издательство АзФАН Баку, 1940 г., 112 стр., 31 рис., 400 экз., ц. 3 руб.

Рассматриваемая книжка представляет собой материал докторской работы автора на соискание ученой степени кандидата технических наук.

В первой главе производится обзор существующих теорий и воззрений на механизм развития разряда молний.

Вначале дается общее понятие по вопросу образования разряда. Детально разбираются некоторые теории, имеющие большой интерес в свете представлений о механизме развития молний. Так например, рассматриваются теории Симпсона, Дорсе, Типлера и др.; отдельные элементы этих теорий сопоставляются между собой, подвергаются критике и на базе этого анализа делаются соответствующие выводы.

Во второй главе рассматриваются существующие методы изучения механизма развития молний и ее отдельных параметров. При этом автор делает обзор различных методов изучения данного вопроса, рассматривая: магнитный метод, метод, базирующийся на термическом и механическом действии тока молний, клиоднографический, катодно-осциллографический и др.

В самостоятельную главу (III) выделен подробно рассматриваемый оптический метод (как наиболее плодотворный) изучения механизма развития молний. В этой же главе подробно описывается механизм развития молний в ее отдельных стадиях. Описываются современные представления о формировании лидера, развития главного канала, повторности

молний и т. д. При анализе указанных вопросов дается и качественная и количественная характеристики.

В последней, IV главе рассматривается экспериментальная часть работы, проделанная автором при организации экспедиции на оз. Севан, являвшейся частью исследований, проводившихся Энергетическим институтом Академии Наук СССР совместно с Азербайджанским филиалом Академии и др. научно-исследовательскими организациями.

Дается полное описание всей установки отдельных приборов, их испытание и градуировка. Здесь же дается анализ полученного в результате полевых работ материала с соответствующими выводами.

Некоторые теории заграничных исследователей приводятся автором без необходимой критики, как, например, указжу на теорию Шонланда образования многоимпульсных молний (стр. 74).

В нашей литературе вопросы, рассмотренные в рецензируемой книге, уже нашли свое отражение, однако наличие в ней новых экспериментальных материалов указывает на рост кадров-специалистов, работающих над проблемой молний, в филиалах Академии Наук СССР.

Д-р техн. наук И. С. СТЕКОЛЬНИКОВ  
Энергетический институт Академии Наук СССР

## НОВЫЕ КНИГИ

Вербовский Е. И. Электрические нагревательные приборы. М.—Л., Госэнергоиздат, 1940, 36 стр. с иллюстр. и чертеж. Ц. 1 р. 25 к.

Дивавин Н. И. Переменные токи. М. Оборонгиз, 1940. 96 стр. с черт. Ц. 7 руб.

Лебедев С. А., Жданов П. С., Городской Д. А. и Кантор Р. М. Устойчивость электрических систем и динамика перевапряжения. М.—Л.

Госэнергоиздат, 1940. 304 стр. с иллюстр. и чертеж. (Труды Всес. электротехн. ин-та, вып. 40). Ц. 13 р. 50 к.

Лившиц Н. А., Спицын Д. В. и Данилин А. В. Синхронные и счеткорешающие устройства Л., Изд. Военно-электротехн. Академии Кр. Армии им. Буденного, 1940. 435 стр. с чертеж. Ц. 35 руб.

Производственные нормы времени на теплоэлектромонтажные работы (разработаны Нар. ком. электростанций СССР). М.—Л. Госстройиздат, 1940.

Вып. 2. Монтаж распределительных устройств напряжением 6220 kV и высокочастотной связи по линиям электропередач. 240 стр. с иллюстр. и чертеж. Ц. 7 р. 75 к.

Вып. 4. Монтаж синхронных компенсаторов мощностью 5—50 MW. 64 стр. Ц. 1 р. 80 к.

Сборник задач и примеров по электрическим машинам. Под общ. ред. Д. А. Завалишина. Утв. ГУУЗ НКЭП в качестве учебн. пособия для энергетических вузов. Л.—М., Госэнергоиздат, 1940. 328 стр. с чертеж. Ц. 10 руб.

Степанов В. Н. и Кулешов Б. В. Сооружение и экс-

плотация кабельных сетей. Под ред. В. Н. Степанова. Утв. ГУУЗ НКЭП СССР в качестве учебника для курсов мастеров соцтруда и учебн. пособия для энергетич. техникумов. М.—Л., Госэнергоиздат, 1940. 484 стр. с иллюстр. и чертеж. Ц. 17 р. 60 к.

Ширман Г. Л. Электрические методы интегрирования и дифференцирования. М.—Л., Изд-во Академии наук СССР, 1940. 68 стр. с чертеж. Ц. 5 руб.

Щукин Б. К. Телеуправление. М. Гос. издат. оборононной промышленности, 1940. 347 стр. с иллюстр. и чертеж. Ц. 15 р. 50 к.

## РЕФЕРАТЫ

### ЭЛЕКТРОТЕХНИКА ЗА ГРАНИЦЕЙ

#### ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

S. E. Hutton. Оборудование гэс Гранд-Кули. *Mechanical Eng.*, стр. 651—660, № 9, 1940.

Строительство величайших в мире плотины и гидроэлектрической установки Гранд-Кули<sup>1</sup> на р. Колумбия (США) в настоящее время ведется неослабевающими темпами. По окончательному проекту гэс оборудуется 18 основными генерирующими единицами мощностью каждая 108 MVA при 13,8 kV, 60 Hz и тремя агрегатами собственных нужд, каждый мощностью 10 MW при  $\cos \varphi = 0.8$ . Две малых турбины, мощностью каждая 14 тыс. л. с., были установлены весной и летом 1940 г. для привода двух генераторов собственных нужд мощностью 12,5 MVA. Главные агрегаты размещаются в машинном зале длиной 180 м и шириной 23 м, с расстоянием между осями 20 м. Они будут самыми мощными гидротурбинными агрегатами в мире. Вертикальные спиральные турбины Френсиса, развивающие мощность 150 тыс. л. с. при напоре 100 м и 90 тыс. л. с. при напоре 80 м, имеют скорость 120 об/мин. Диаметр рабочего колеса — 5,2 м. К. п. д. 90%—гарантирован при мощности турбины от 120 тыс. л. с. до 130 тыс. л. с. Интересно отметить, что главный вал агрегата длиною 22,5 м и диаметром 1,12 м имеет осевое отверстие диаметром 152 mm для исследования материала вала после изготовления последнего и для подачи воздуха в возможные области вакуума в турбине с целью устранения явлений вибрации и кавитации. Давление на подшипник — 1300 t. Ротор генератора диаметром 9,7 м имеет маховой момент 25000 tm<sup>2</sup>. Пневматический тормоз останавливает ротор с половинной скорости в течение 7½ min. Общий вес генератора 1075 t. Внешний диаметр генератора 13,7 м и высота его над полом зала — 6,7 м. Гарантированный к. п. д. при полной нагрузке 97,4%. К каждому из генераторов присоединена через выключатели группа из трех однофазных трансформаторов — 36 MVA с 13,8 kV на 132,8/230 kV. Трансформаторы открытого типа с погруженным в масло сердечником, водяного охлаждения.

Плотина, западное здание гэс, подводная часть насосной установки, три главных агрегата и два агрегата местных нужд должны быть готовы в начале 1942 г. Полная сметная стоимость строительства составляет 394 млн. долл., из них: плотина — 119 млн. долл., гэс — 67 млн. долл., ирригационная система — 208 млн. долл.

Канд. техн. наук Н. А. КАРАУЛОВ

царии при сезонном гидравлическом регулировании развиваются в это время всего лишь  $2-2,5 \cdot 10^3$  MW, в то время как для отопления требуется  $13 \cdot 10^3$  MW.

Решение задачи заключается в переходе к необычно большим геометрическим размерам аккумуляторов тепла. Автором теоретически изучены случаи применения аккумулятора горячей воды емкостью в несколько тысяч м<sup>3</sup> и подземного аккумулирования тепла в естественном грунте. Расчеты показали, что оба метода дают к. п. д. от 80 до 90% за период времени 8760 h, что соответствует эффективности аккумулирования энергии в условиях гидроэлектрических установок, располагающих сезонным регулированием стока. Современные трудные условия топливоснабжения Швейцарии и общая неопределенность хозяйственной конъюнктуры делают поставленную задачу весьма актуальной.

Осуществление ее упирается в разрешение ряда вопросов физики и техники.

Канд. техн. наук Н. А. КАРАУЛОВ

M. Bologna. Небольшая гэс на горном потоке Бреветто. *L'Elettronica*, стр. 322—327, № 13, 1940.

Оригинальная схема использования энергии потока Бреветто (Италия) включает три гидроэлектрических установки деривационного типа: вновь построенную гэс Монтецекено мощностью 1100 kW с двумя питаниеми турбин водой при напорах 418 м и 190 м, а также сооруженные ранее гэс Креста и Овеска каждая с напором около 150 м, общей мощностью 770 kW. Установленная мощность всего каскада гэс составляет 1,87 MW при годовой выработке энергии 8000 MWh. Пробная эксплуатация гэс Монтецекено начата в январе 1940 г. после окончания сооружения ее в течение двух лет в очень трудных природных условиях. Гэс оборудована двумя электрическими генераторами горизонтального типа мощностью 400 kVA и 950 kVA, 3800 V и 50 Hz, непосредственно приводимыми в действие турбинами Пельтона, делающими 1000 об/мин. Энергия передается генераторным напряжением на расстояние 2 km по алюминиевым проводам воздушной линии. В статье отмечено, что практика использования энергии небольшого горного потока Бреветто еще раз подтверждает целесообразность эксплуатации малых природных ресурсов наряду с освоением крупных источников водной энергии.

Канд. техн. наук Н. А. КАРАУЛОВ

P. Seehaus. Проблема аккумулирования летней гидроэнергии в Швейцарии. *Bull. ASCE*, стр. 317—331, № 15, 1940.

В статье исследуется проблема аккумулирования в форме тепла избыточной летней гидроэлектрической энергии, преимущественно для целей отопления в течение зимнего сезона. Зимней гидроэнергии для этих целей совершенно недостаточно вследствие того, что гидроэлектрические установки Швей-

<sup>1</sup> См. «Электричество», стр. 54—55, № 2, 1938.

H. Estrada, H. A. Dryar. Опыт регулирования нагрузки и частоты Филадельфийской системы. *Transactions of the ASME*, стр. 221—235, № 3, 1940.

Реферируемая статья рассматривает опыт Филадельфийской электрической компании (США) в области регулирования нагрузки и частоты электроэнергетической системы, включая диспетчерское управление генерирующей мощностью под углом зрения наибольшей надежности и экономичности электро-

спабжения. В частности, рассмотрена важная проблема оптимального использования в системе незарегулированной гидроэлектрической станции Коновинго с установленной мощностью 252 MW, которая в средний по водоносности год вырабатывает около  $\frac{1}{3}$  всей электроэнергии, потребляемой системой.

Для точного установления пределов перегрузки агрегатов гэс в дневные часы суток учитываются «нормы приращений»  $\Delta Q/f^3/\text{sec}$

гэс  $W = \frac{\Delta N \text{ kW}}{\Delta t \text{ sec}}$ , которые быстро возрастают при переходе в области открытий турбины больших 0,60—0,68.

Вместе с тем при всех условиях перегрузочная способность гэс за пределом  $\eta_{\max}$  должна использоваться, как резерв мощности системы.

Канд. техн. наук Н. А. КАРАУЛОВ

**O. Holden. Опыт регулирования частоты в электроэнергетических системах Канады.**  
*Transactions of the ASME, стр. 237—240, № 3, 1940.*

В статье рассматриваются характерные особенности регулирования частоты для ряда типичных систем различной величины в провинции Онтарио, генерирующая мощность которых представлена почти исключительно гидроэлектрическими установками.

Наименьшая из рассматриваемых системы St. Joseph District состоит из одной небольшой гэс, оборудованной двумя агрегатами в 2 MVA и 1.5 MVA.

Гэс питает рудники с резко переменной нагрузкой. Вследствие того, что пики нагрузки иногда превосходят мощность гэс, допускаются значительные колебания частоты системы в пределах приблизительно от 62 Hz до 55 Hz при нормальной частоте 60 Hz.

В более мощной системе Abitibi District, питающей также рудничную нагрузку, частота поддерживается очень точно. Располагаемая мощность системы в этом случае составляет 240 MW (5 агрегатов гэс).

Крупнейшая система провинции Онтарио Niagara System, снабжающая энергией 180 муниципалитетов, 87 сельских объединений и ряд крупных промышленных предприятий, имеет пик нагрузки около 1,4 млн. л. с. Три гэс, расположенные у водопада Niagara и имеющие общую мощность 830 тыс. л. с. в 36 агрегатах (каждый от 11,7 до 58 тыс. л. с.), питают центральную часть рассматриваемой системы. Многие индустриальные потребители системы требуют очень точного поддержания частоты. Неожиданное выпадение крупнейшего агрегата не вызывает падения частоты системы вследствие огромной кинетической энергии оставшихся агрегатов. Поддержание частоты выполняет одна гэс, в то время как прочие гэс работают по графику, указанному центральным диспетчерским пунктом. Для этого на регулирующей гэс Queenston установлены весьма точно работающие автоматические регуляторы частоты. В случаях очень сильных нарушений режима системы эти приборы автоматически выключаются, и восстановление нормальной частоты осуществляется от руки.

Канд. техн. наук Н. А. КАРАУЛОВ

**W. F. Rheingans. Колебания мощности на гидроэлектрических установках.**  
*Transactions of the ASME, стр. 171—184, № 3, 1940.*

Колебания мощности, имеющие своим источником водяные турбины типа Френсиса и пропеллерные, отмечались на некоторых гидроэлектрических установках уже с 1912 г. Однако только за последнее десятилетие было удалено внимание изучению этих колебаний, их характеристикам, происхождению и способам их устранения. Выяснилось, что частота колебаний мощности приближенно равна  $\frac{1}{3}$  скорости агрегата, а амплитуда практически может лежать в пределах от 5 до 100% его мощности. Колебания мощности гэс этого вида, хотя они практически редко причиняют заметные неудобства, в некоторых случаях рассматривались как источник понижения устойчивости системы. Исследования показали, что колебания этого рода всегда вызываются периодическими изменениями вращающего момента рабочего колеса турбины. Последние в свою очередь связаны с пульсацией вакуума во всасывающей трубе и с колебаниями давления в трубопроводе.

Особенно значительными оказываются эти колебания в том случае, если их частота ( $S \approx \frac{n}{3,6}$ ) близка к частоте соб-

ственных колебаний электрического генератора, присоединенного к системе. Средствами предупреждения или значительного сокращения колебаний мощности являются: правильный расчет агрегата, с устранением возможности резонанса пульсаций вакуума во всасывающей трубе и собственных колебаний генератора путем подачи воздуха во всасывающую трубу или изменением ее геометрических размеров. Колебания с амплитудой не более 10% мощности агрегата могут быть допущены без вреда для работы генератора и для устойчивости системы.

Сообщение вызвало оживленную дискуссию, которая касалась многих сторон проблемы и показала, что рассматриваемый сложный вопрос все же теоретически не вполне ясен и требует дальнейших исследований.

Канд. техн. наук Н. А. КАРАУЛОВ

**ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЯГА**

**Перевод на постоянный ток линии Гамбургской скоростной электрической железной дороги.**  
*El. Bahnen, стр. 91—92, Heft 6, 1940.*

Гамбургская скоростная электрическая железная дорога Blankenese — Poppenbüttel имеет общее протяжение 32,5 km. С 1908 г. до начала 1940 г. дорога эксплуатировалась на однофазном переменном токе 6300 V, 25 Hz. В распоряжении дороги имелось 145 поездных единиц.

За долгие годы эксплуатации эта дорога дала хорошие технические и экономические показатели, однако оборудование ее настолько устарело, что встал вопрос о полной его замене.

При реконструкции этой дороги первоначально предполагалось применить опять систему однофазного тока, но решение о частичном подземном прохождении линии обусловило стремление к минимальным габаритам, а следовательно, вызвало необходимость отказа от контактного провода. Замена контактного провода третьим рельсом вызвала ограничение напряжения и обусловила в конечном итоге выбор для питаения реконструируемой Гамбургской скоростной электрической железной дороги системы постоянного тока напряжением 1200 V.

Участок Ohlsdorf — Poppenbüttel уже сдан в эксплуатацию.

Инж. Ю. М. ГАЛОНЕЦ

**A. Peters, A. Knipper. Подвижной состав Гамбургской скоростной электрической железной дороги постоянного тока.**  
*El. Bahnen, стр. 95—118, Heft 7, 1940.*

Новый подвижной состав рассчитан на пусковое ускорение до выхода на автоматическую характеристику — 0,9 m/sec<sup>2</sup>. Среднее замедление поезда при торможении — 0,7 m/sec<sup>2</sup>.

При разработке схемы предстояло установить наилучший режим ведения поезда: при неизменном токе поезда (рис. 1, а) или неизменном токе двигателя (рис. 1, б). Наилучшим оказался вариант б, хотя при этом варианте пе-

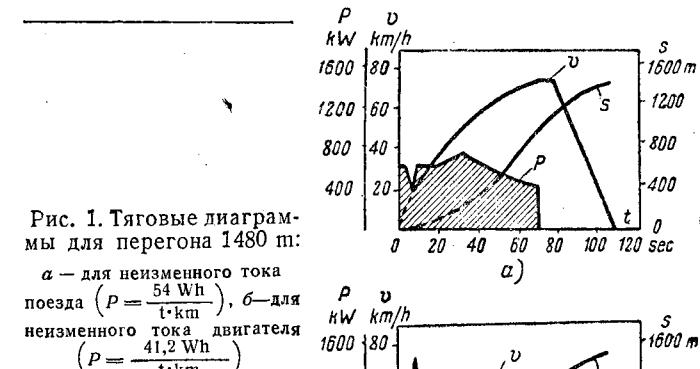


Рис. 1. Тяговые диаграммы для перегона 1480 т:

а — для неизменного тока  
поезда ( $P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$ ), б — для  
неизменного тока двигателя  
( $P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$ )

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{41,2 \text{ Wh}}{\text{t} \cdot \text{km}}$$

$$P = \frac{54 \$$

ки мощности достигали 1400 kW против 800 kW при варианте а. Зато удельный расход энергии составил для варианта б 41,2 Wh/t·km против 54 Wh/t·km для варианта а.

Среднеходовая скорость подвижного состава, при эксплуатации на постоянном токе, была выбрана в 40 km/h, т. е. на 20% выше, чем при ранее курсировавшем составе переменного тока. Дальнейшее увеличение ходовой скорости представлялось нецелесообразным, в связи с резким возрастанием удельного расхода энергии. Так, если удельный расход энергии для ходовой скорости в 40 km/h составил 48 Wh/t·km, то при дальнейшем повышении ходовой скорости всего на 10% удельный расход энергии возрастает на 46%.

Для выбранной ходовой скорости максимальная скорость на среднем перегоне достигает 67 km/h, а на перегоне максимального протяжения (2400 м) — 80 km/h.

Теоретический анализ возможности внедрения рекуперативного торможения показал предельно возможную экономию энергии в 39%, от энергии, затрачиваемой на моторном режиме, что привело к выводу о целесообразности оборудования нового подвижного состава рекуперативным торможением.

Каждый моторный вагон оборудуется 4 серийными тяговыми двигателями часовой мощностью 145 kW при скорости 700 об/мин, токе 270 A и напряжении 600 V. Два двигателя постоянно соединены последовательно.

Для возбуждения серийных обмоток тяговых двигателей при рекуперативном торможении служит специальный трехмашинный возбудительный агрегат, состоящий из двигателя (30 kW, 1200 V, 32A, 1700 об/мин), главного генератора (26 kW, 100 V, 260 A) и вспомогательного генератора (0,25 kW, 62 V, 4,8 A), расположенных на одном валу.

Цепь управления и освещения питается напряжением 110 V, получаемым от вспомогательного преобразователя.

Управление электропоездом — полуавтоматическое. Пуск двигателей происходит при посредстве двух реле ускорения, установленных в каждой цепи двигателей. Потери в пусковых реостатах сведены до минимума, так как низкое положение скоростных характеристик обеспечивает малое время езды на реостатах (12 sec).

Пусковые сопротивления нового подвижного состава оригинальной конструкции выполнены штампованными из листовой стали с последующей растяжкой.

Принято совершенно новое расположение аппаратуры под вагоном, все в отдельных ящиках-агрегатах, а в общем ящике. Принятое расположение аппаратуры представляет значительные удобства для монтажа оборудования и обеспечивает возможность удобного осмотра и ремонта. Для предупреждения попадания влаги и снега в аппаратуру внутрь аппаратурного ящика нагнетается часть вентиляционного воздуха из пассажирского помещения.

Рекуперативное торможение рассчитано на работу с максимальной скоростью до скорости в 35 km/h. Таким образом обеспечивается полезное использование 81% живой силы поезда. Со скорости 35 km/h начинает работать реостатное торможение. Окончательное торможение поезда перед остановкой осуществляется пневматическим тормозом.

Инж. Ю. М. ГАЛОНЕН

### Электропоезда для чилийских железных дорог. *Siemens Zeitschr.*, стр. 123—124, № 3, 1940.

SSW выполняет заказ по поставке электрооборудования для электрификации пригородных участков Santiago — Cartagena (118 km) и Valparaiso — Calera (68 km) Чилийских железных дорог.

Новые электрифицированные участки предназначаются для эксплуатации на постоянном токе напряжением 3000 V. Предметом поставки являются 3 товарных электровоза и 11 моторвагонных секций. Новые моторвагонные секции предназначаются для эксплуатации с максимальной скоростью 130 km/h.

Каждая секция состоит из трехвагонного состава цельнометаллической конструкции весом 144 t. 3 кузова поездной единицы расположены на двух тележках системы Jacobs и двух концевых двухосных тележках. На концевых тележках поезда размещаются 4 серийных тяговых двигателя часовой мощностью по 350 kW каждый. Наличие столь мощных тяговых двигателей обеспечивает моторвагонному составу значительное пусковое ускорение в 1,13 m/sec<sup>2</sup>.

Управление поездом осуществляется от контроллера с электродвигательным приводом.

Новая моторвагонная секция снабжена устройствами для обеспечения безопасности, к которым в первую очередь следует отнести ограничитель скорости, выключающий силовую цепь при превышении предельной скорости (130 km/h). От-

правление поезда может произойти только при наличии номинального давления сжатого воздуха в тормозной системе. Снижение давления сжатого воздуха во время эксплуатации также влечет за собой отключение цепи управления и остановку поезда.

Инж. Ю. М. ГАЛОНЕН

### Подстанционное оборудование лондонского метрополитена. *The Railway Gaz.*, стр. 117—121, № 5, 1940.

Северная линия лондонского метрополитена питается от десяти подстанций, в число которых входит главная подстанция, питаемая трехфазным током 11 kV, 50 Hz от двух силовых станций. На этой подстанции установлены три 1500 kW, 630 V выпрямители, в то время как на остальных станциях только по два. Выпрямители соединены с шинами через быстродействующие автоматы, а шины непосредственно соединены с третьим рельсом. На каждой подстанции установлено по одному трансформатору 300 kVA, 11000/650 V, пытающему освещение пассажирских станций. Десять автоматических подстанций оборудованы дальней управлением по двумя радиально-сигнальным проводам.

Из высоковольтного оборудования следует отметить масляные выключатели, состоящие из трех однополюсных баков, оборудованных демпферными решетками и имеющих разрывную мощность в 350—500 MVA.

Силовые трансформаторы, пытающие ртутные выпрямители мощностью в 2015 kVA, имеют при шестифазных обмотки. Вторичные обмотки соединены в две двойных звезды с общим междуфазовым реактором, первичные обмотки трансформаторов на различных подстанциях соединены в звезду или в треугольник, что сводит до минимума влияние гармоник напряжения работающих выпрямителей на высоковольтные линии.

12-аандные водоохлаждаемые выпрямители, несущие продолжительно нагрузку в 2380 A, выдерживают 50% перегрузку в течение двух часов и 200% в течение 5 sec.

Начальное зажигание дуги и поддержание ее при холостом ходе достигается при помощи вспомогательного источника постоянного тока (трехфазный стеклянный выпрямитель). Эта система абсолютно устойчива при всех возможных условиях нагрузки выпрямителя и колебаниях температуры.

Система охлаждения главного выпрямителя и ртутного насоса комбинированная — водяная циркуляционная и воздушная. Главный охлаждающий вентилятор автоматически управляет терmostатом в главной охлаждающей системе и выключается при малых нагрузках.

Со стороны катода выпрямители защищены быстroredействующими автоматами обратного тока, блокированными с масляными выключателями.

На подстанциях установлены никель-кадмевые щелочные батареи емкостью в 45 Ah при среднем разрядном напряжении в 60 V. На подстанциях же установлены и купрокисловые выпрямители для подзаряда упомянутой батареи.

Системы дальней управления и измерения позволяют включать высоковольтное оборудование, быстroredействующие автоматы, фидерные выключатели освещения и получать сведения о нагрузке выпрямителей, напряжении на шинах и вакууме выпрямителей.

Инж. М. Д. ТРЕЙВАС

### G. H. Fletcher. Электромобили. *M.—V. Gaz.*, стр. 28—33, № 328, 1940.

Автор отмечает значительные сдвиги в строительстве электромобилей, в связи с организацией планового серийного выпуска электромобилей крупными электротехническими фирмами.

Основным оборудованием электромобиля является аккумуляторная батарея. За последнее время в области создания надежных конструкций аккумуляторных батарей сделаны большие успехи, в частности, значительно повысился срок службы аккумуляторных батарей. Так, известно много случаев, когда гарантированный трехгодичный срок службы свинцово-кислотных аккумуляторных батарей повышен до 4,5 лет.

Весьма существенную роль в обеспечении надежности и компактности оборудования электромобиля сыграло применение современных видов изоляции для тяговых двигателей (асбест, стеклянное волокно).

Применение современных изоляционных материалов класса В—С дает возможность создать надежный тип тягового двигателя минимальных габаритов и веса, перегрузочная способ-

ность которого практически ограничивается только коммутационными свойствами двигателя.

Для повышения экономичности пуска в электромобилях широко применяется серийно-параллельное соединение частей аккумуляторной батареи. Помимо уменьшения непроизводительного расхода энергии электромобиль получает минимум 2 ходовых экономических скорости.

Весьма существенную роль в конструкции электромобилей играет и наиболее рациональная конструкция механической части электромобиля. Рама современных электромобилей выполняется целиком сварной конструкции из листовой стали, что позволяет получить значительное облегчение всей конструкции электромобиля в целом. Так например, рама электромобиля типа MV-7/9 (грузоподъемностью до 9 центнеров—460 kg) весит всего 52 kg.

В настоящее время фирма Metropolitan Vickers выпускает ряд типов электромобилей различной грузоподъемности начиная с типа MV-7/9 до типа MV-25/30 (грузоподъемностью до 1,5 t). Емкость аккумуляторной батареи, установленной на электромобиле, в зависимости от грузоподъемности колеблется от 96 до 323 Ah.

Проведенные автором исследования показывают, что стоимость эксплуатации электромобиля значительно меньше автомобиля. Так например, если принять эксплуатационные расходы автомобиля грузоподъемностью в 1 t за 100%, то эксплуатационные расходы (включая амортизацию оборудования) для электромобиля составят всего лишь 68%. Первоначальная стоимость электромобиля, однако, выше, чем автомобиля.

Эффективность эксплуатации электромобиля в значительной мере зависит от правильного выбора радиуса действия электромобиля, при выборе типа и мощности аккумуляторной батареи.

Минимальные эксплуатационные расходы дает радиус действия на одну зарядку в 25—30 миль (40,4—48,5 km). Первоначальная стоимость оборудования для этого пробега также является минимальной.

В заключение автор высказывает предположение, что дефицитность жидкого горючего вызовет дальнейший рост числа электромобилей в Англии.

Инж. Ю. М. ГАЛОНЕН

## Троллейбусы для Durban. M.—V. Gaz., стр. 37—38, № 328, 1940.

Metropolitan Vickers выполняет заказ Durban Corporation на 13 двухэтажных троллейбусов. Каждый троллейбус рассчитан на 70 пассажиров, имеет трехосное выполнение и весит 14,5 t.

Троллейбус оборудуется компаундным двигателем типа MV-206, часовой мощностью 105 л. с. при напряжении 550 V.

Особенностью электрической схемы троллейбуса является почти полный отказ от рекуперативного торможения. Первый вариант схемы предусматривал протекание скользящей характеристики полного поля, исключающее возможность рекуперативного торможения. В качестве основного вида торможения предусматривается реостатное торможение. При реостатном торможении возбуждается только шунтовая обмотка; серийная обмотка в тормозной цепи не участвует.

Окончательный вариант схемы, принятый исключительно из соображений использования существующей аппаратуры, допускает возможность незначительного рекуперативного торможения.

Новые троллейбусы оборудуются автоматическим противотяговым тормозом, действующим в положении рукоятки контроллера «вперед» в случае, если скорость обратного отката троллейбуса превышает 2 мили в час (3,2 km/h).

Инж. Ю. М. ГАЛОНЕН

## T. H. Craton, F. M. Turner. Электрическое торможение электротранспорта. El. Eng., стр. 489—494, № 9, 1940.

Реферируемая статья посвящена характеристике современного состояния тормозной проблемы магистральных железных дорог и городского электротранспорта.

По мере возрастания скоростей современных поездов до 100 миль в час (160 km/h) и увеличения длины поезда до 100—150 вагонов проблема эффективного торможения приобретает все большее значение.

Авторы констатируют, что полезное торможение применяется, главным образом, на электрических железных дорогах. За последнее время делаются попытки использования кинетической энергии и на паровых поездах. Классическим примером этих попыток является оборудование для полезного торможения на турбоэлектровозе 5000 л. с. для Union-Pacific Railway. Здесь электрическая энергия, вырабатываемая при торможении генераторами, работающими на реостаты, превращается в тепловую энергию путем подогрева и обогревания в пар воды, омывающей реостаты. Полученный таким образом пар поступает в котел турбоэлектровоза.

Несколько эффективно применение рекуперативного торможения, авторы рассматривают на простом, но весьма характерном примере. При торможении 1000 t поезда, ведомого 185 t электровозом, со скоростью 80 миль в час (128 km/h) кинетическая энергия поезда составляет  $428 \cdot 10^6$  фут-фунтов ( $60 \cdot 10^6$  mkg). При торможении с замедлением 2 мили в час ( $0,9 \text{ m/sec}^2$ ) тормозное усилие, потребное для остановки поезда, составляет  $182 \cdot 10^3$  фунтов ( $83,5 \cdot 10^3$  kg) или эквивалентно 19 400 л. с., т. е. составляет 277% от максимальной мощности электровоза.

Эффективность рекуперативного торможения при современных тормозных схемах оценивается авторами в 15% экономии энергии (от затрачиваемой на двигательном режиме) при езде на равнинном участке, достигая 60% при езде на спуске в 20%.

Рассматривая различные виды торможения подвижного состава городского транспорта, авторы подчеркивают возрастающую роль электромагнитного рельсового тормоза. Так например, электрическое торможение трамвайного вагона РСС обеспечивает плавное замедление в  $4\frac{1}{4}$  мили в час ( $2,1 \text{ m/sec}^2$ ), из которых  $1\frac{1}{4}$  мили в час ( $0,55 \text{ m/sec}^2$ ) обеспечивается электромагнитным рельсовым тормозом.

Авторы указывают на целесообразность применения электрического торможения также и на дизель-электробусах. Наиболее плавное торможение обеспечивается современными схемами с компаундными двигателями.

Реферируемая статья снабжена большой библиографией по рекуперации электрической энергии.

Инж. Ю. М. ГАЛОНЕН

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

W. Büssing. Упрощенный расчет нагрева электрических машин. Arch. f. El., стр. 473—480, Heft 8, 1940.

Точное расчетное определение нагрева электрических машин можно произвести, пользуясь известным уравнением:

$$k_{Cu} \frac{d^2\tau}{dx^2} - \frac{u}{f} h(\tau - \tau_L) + v_0(1 + \alpha\tau) = 0.$$

Однако решение этого уравнения является довольно громоздким и достаточно сложным. Автор реферируемой статьи, изыскивая методы упрощенных расчетов, приходит к выводу, что все расчеты без учета перепада температур дают явно неприемлемые результаты. На основании теоретических исследований автором устанавливается возможность определить максимальную температуру машины, зная машинную постоянную и среднюю температуру обмоток машины. Средняя температура обмоток может быть всегда легко спределена экспериментальным путем, например по методу сопротивления.

Принимая, что теплоотдача любой части машины пропорциональна средней температуре всей машины, автор выводит уравнение, определяющее отношение максимального перегрева машины к среднему перегреву:

$$\frac{\tau_{max}}{\tau_{min}} = 1 + \left( \lambda_1 \frac{u_1}{f} - \alpha v_{10} - \frac{v_{10}}{\tau_{cp}} \right) \frac{L_1}{24k_{Cu}} (2L_1 + L_2),$$

где  $u$  — периметр проводника;  $f$  — сечение проводника;  $k_{Cu}$  — теплопроводность меди;  $L_1$  — длина лобовых частей обмотки;  $L_2$  — длина железа якоря;  $v$  — количество выделенного тепла в  $\text{W/m}^3$ ;  $\lambda$  — теплопроводность изоляционного материала.

Найденное автором уравнение дает возможность точно произвести тепловой расчет электрических машин, пользуясь графическим методом основные положения которого также рассматриваются в реферируемой статье.

Инж. Ю. М. ГАЛОНЕН

**K. Baudisch, A. Siemens.** Мутаторы и новые области их практического применения. *E. u. M.*, стр. 453—462 и стр. 473—478, *Heft 35/36* и *Heft 37/38*, 1939.

Управляемые выпрямители со стеклянным сосудом строятся на токи до 500 А, а с металлическим — до 10 000 А. Такое увеличение нагрузки одного сосуда оказалось возможным благодаря улучшению качества фарфоровой изоляции и анодных головок из графита. Применение новых материалов для вводных изолятов и анодных головок позволило уменьшить габариты и упростить конструкцию металлических сосудов. Главнейшие изменения, внесенные в конструкцию металлических выпрямителей, сводятся к устройству сосуда без верхней конденсационной камеры, но с внутренними кольцеобразными радиаторами для конденсации ртутных паров и применению анодной плиты вместо отдельных съемных анодов. Кроме того, для зажигания дуги уже не применяется обычная игла, а используется зажигание ртутной струйкой (*Spritzzündung*), как у стеклянных выпрямителей большой мощности.

Опыт использования улучшенных сортов фарфора позволяет современным выпрямителям весьма долго нести нагрузку при остановленных вакуумных насосах, что привело к созданию герметических (запаянных) выпрямителей с металлическим сосудом.

Сравнение цен и эксплоатационных показателей стеклянных и металлических сосудов показывает, что для больших мощностей (350÷500 А в одном сосуде) герметический выпрямитель выгоднее стеклянного. При малых мощностях, напротив, выпрямители с стеклянной колбой выгоднее герметического выпрямителя с металлическим сосудом.

Для питания радиопередатчиков большой мощности до последнего времени применялись металлические выпрямители. В настоящее время для питания анодной цепи генераторных ламп мощных радиопередатчиков применяются также герметические выпрямители с воздушным охлаждением для выпрямленного напряжения 18—20 кВ.

Самые мощные выпрямители, например, на 5000 А имеют смешанное охлаждение с непрерывно работающими вакуумными насосами.

Выпрямители такого типа нашли себе широкое применение в установках для электролиза. В настоящее время работает несколько установок мощностью до 68 000 кВт, и одна установка на 100 000 кВт находится в постройке. Так как для установок такой большой мощности вопрос о гармониках первичного тока имеет первостепенное значение, то выпрямители были сделаны двенадцатифазными, что позволило устранить 5-ю и 7-ю гармоники первичного тока и иметь в качестве низшей гармоники первичного тока 11-ю и 13-ю гармоники. Для уничтожения этих гармоник каждые два или три двенадцатифазных выпрямителя снабжались такими витагтрансформаторами, чтобы на первичной стороне образовать 24 или 36-фазную систему.

Ртутные выпрямители нашли также широкое применение для питания приводов мощных прокатных станов, где управляемый выпрямитель с успехом вытесняет мотор-генераторы Леонарда. Кроме простоты и гибкости, управляемый выпрямитель на 800 В дает к. п. д. 95% в диапазоне нагрузок от  $\frac{1}{4}$  до полной, тогда как мотор-генератор Леонарда имеет максимальный к. п. д. 92% при  $\frac{3}{4}$  нагрузки и не выше 85% при  $\frac{1}{4}$  номинальной нагрузки. При двигателях суммарной мощностью в 12—15 МВт повышение к. п. д. на 5÷10% дает уже весьма заметную экономию энергии. Кроме того, простота сеточного управления позволяет повысить производительность прокатных станов.

В заключение авторы реферируемой статьи считают, что стеклянные выпрямители большой мощности будут постепенно вытесняться герметическими выпрямителями с металлическим сосудом, которые со временем придут на смену современным выпрямителям с водяным охлаждением и вакуумными насосами.

В реферируемой статье рассматриваются также схемы управления приводом прокатных станов с помощью мутаторов<sup>1</sup>.

Канд. техн. наук В. А. СОЛОВЬЕВ

**F. Küsselring.** Экспансионные выключатели за 10 лет. *ETZ*, стр. 509—515, № 23, 1940. **B. W. Kaufmann.** Выключатель высокого напряжения для гашения коротких замыканий. *Siemens Zeitschr.*, стр. 12—16, № 1, 1940.

За 10 лет SSW изготовили 35 000 водяных выключателей для напряжения от 3 до 60 кВ и около 1000 малообъемных масляных выключателей для напряжения от 60 до 220 кВ. Количество нормальных масляных выключателей снизилось до 3%.

Жидкость, применяющаяся для гашения, состоит из воды и гликоля  $[C_2H_4(OH)_2]$ , причем для уменьшения количества газов при разрыве больших токов содержание гликоля берется незначительным, а при более высоких напряжениях (малых токах) количество гликоля увеличивается для получения большего количества газов и для понижения температуры замерзания (до  $-85^{\circ}$ ). Малое количество газов объясняется обратным соединением Н и О в воду.

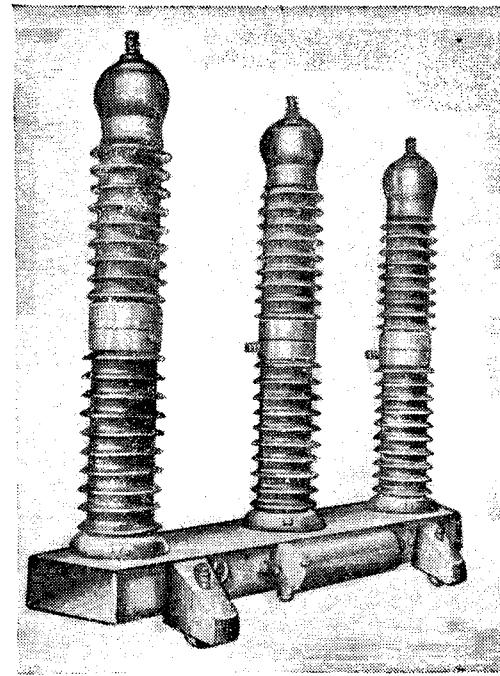


Рис. 1

Так как расстояние между контактами, при котором происходит гашение дуги, имеет чрезвычайное значение для выбора размеров и определения стоимости выключателя, то на уменьшение этой величины было обращено особое внимание. В результате для выключателей на 10 кВ (большие токи) удалось снизить длину дуги с 7 до 1,5 см. При высоких напряжениях (малые токи) длина дуги снизилась вдвое. Это дало возможность уменьшить ход подвижного контакта, а вместе с ним и объем, занимаемый выключателями. Это же уменьшение длины дуги дало возможность построить водяной выключатель на 60 кВ и значительно упростить и уменьшить масляные экспансионные выключатели. Последние теперь значительно отличаются от прежних выключателей, приняв вид колонок, рис. 1. Снаружи у них нет никаких частей привода, убран также сделавшийся не нужным разъединитель. В настоящее время разработана конструкция экспансионных выключателей на 400 кВ.

Из специальных конструкций упоминаются выключатель для шахт с гремучим газом, выключатель для  $16\frac{2}{3}$  Гц с синхронным реле, действующим таким образом, что к моменту перехода тока через нуль получается максимальная длина дуги.

Кроме того, в последнее время изготовлен выключатель для гашения дуговых к. з., в котором, как и у воздушных выключателей, обратное включение происходит разъединителем, шунтирующим искровой промежуток выключателя.

Инж. Л. Б. БРОУДЕ

<sup>1</sup> Эта схема не представляет, однако, ничего принципиально нового для советского читателя, знакомого с недавно вышедшей книгой, по этому вопросу: Бутаев, Пантишев и Эттингер. „Регулируемый электропривод с управляемыми выпрямителями. „Госэнергоиздат“, 1940 (Прим. реф.).

**H. Bapu.** Защита машин постоянного тока. *GER, str. 312—319, № 8, 1940.*

В реферируемой статье даётся обзор применяемых в американской практике способов защиты машин постоянного тока от: 1) внешних коротких замыканий или чрезмерной перегрузки, 2) внутренних повреждений или перекрытия изоляции, 3) чрезмерного повышения скорости (разнос), 4) перехода на моторный режим генератора или синхронного преобразователя, 5) исчезновения возбуждения, 6) повышения напряжения, 7) понижения напряжения, 8) перегрева якоря, 9) изменения полярности, 10) перегрева подшипников.

В статье даётся также обзор защит, применяемых для выпрямителей.

Инж. Б. И. ФИЛИПОВИЧ

**A. Kuntze.** Фотоэлектрический регулятор нового типа. *ETZ, стр. 195—198, Heft 9, 1940.*

Использование фотоэлементов в регуляторе температуры для электрических печей значительно повышает точность регулировки. В регуляторе, схема которого приведена на рис. 1, используется цезиевый газонаполненный фотоэлемент ФЭ, чувствительный к красным лучам ( $300 \mu\text{A}/\text{In}$ ). При попадании на фотоэлемент луча света — на сетку тиратрона появляется отрицательный потенциал, который в пять раз больше, чем необходимо для запирания тиратрона. Поэтому в данной схеме отпадает необходимость в точном поддержании напряжения питания сети, так как колебания силы света  $\pm 70\%$  не оказывают влияния на работу регулятора. Угол отклонения гальванометра определяется разностью э. д. с. двух термопар, одна из которых  $T_1$  помещается в печи, а вторая  $T_2$  в специальном термостате, где поддерживается температура  $50 \pm 0,25^\circ\text{C}$ . Когда температура печи ниже установленного значения, пучок света, отраженный от зеркала гальваниометра, попадает на фотоэлемент, и контакт  $K_1$  катушки контактора  $K_1$  замыкается. Контактор  $K_1$  включает в анодную цепь тиратрона катушку  $R_a$ , что приводит к открытию тиратрона. Тогда контакт  $K_2$  катушки контактора  $K_1$  замыкается, и тиристор  $LK$  открывается, подавая импульс на электропечь. Одновременно с этим контакт  $K_1$  катушки контактора  $K_2$  замыкается, и тиристор  $LJ$  открывается, подавая импульс на линию  $LJ$ .

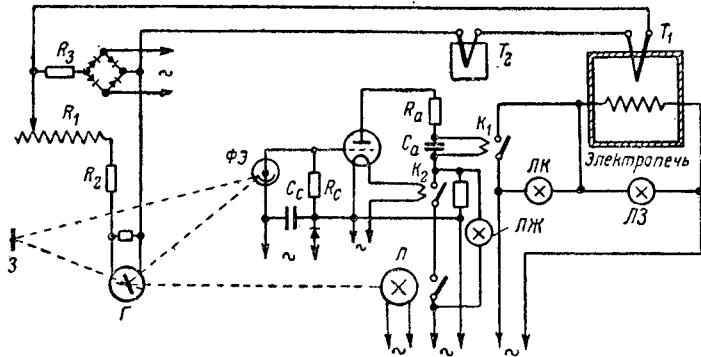


Рис. 1. Принципиальная схема регулятора температуры

ванометра, не попадает на фотоэлемент, и линейный контактор печи  $K_1$ , катушка которого включена в анодную цепь тиратрона, находится в выключенном состоянии. При повышении температуры фотоэлемент освещается отраженным пучком света, в результате чего сетка тиратрона получает отрицательное смещение, и контактор печи отключается. Так как система обладает весьма малой инерционностью, то колебание температуры не превышает  $\pm 0,5\%$ . Настройка регулятора на определенную температуру осуществляется с помощью сопротивления  $R_1$ , включенного в цепь гальванометра. Последовательно с ним включено еще добавочное сопротивление  $R_2 = 1000 \Omega$ , назначение которого — устранить влияние изменения сопротивления соединительных проводников.

Сопротивление  $R_a$  и конденсатор  $C_a$  служат для оглаживания пульсаций анодного тока и уменьшения собственного времени включения контактора. Параллельно термопарам и последовательно с сопротивлением  $R_3 = 1 M\Omega$  включен сухой выпрямитель. При повреждении термопары цепь выпрямителя замыкается только через гальванометр и последний отклоняется левее своего нулевого положения. В результате луч света, отраженный от зеркала гальванометра, попадает на вспомогательное зеркало 3 и оттуда на фотоэлемент, что вызывает мгновенное отключение печи.

Регулятор температуры с фотоэлементом может быть также

осуществлен на компенсационном принципе с использованием мостовой схемы. Компенсационный метод более чувствителен и колебания температуры получаются еще ниже, чем в регуляторе с термопарами.

Инж. Ю. А. САБИНИН

## ИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

**P. M. Tyler, O. Bowles.** Альсифильм. *USA, Bureau of Mines, Inform. Circ. № 7106, 1940.*

Методика изготовления электроизоляционных пленок из глины типа бентонита, носящих предложенное проф. Е. А. Hauser название «Alsiifilm», сводится к следующему. Бентонит размешивается с водой (до концентрации 2%). Более крупные частицы и примеси удаляются отмыванием или центрифугированием. Суспензия сгущается выпариванием или прохождением через суперцентрифугу и разливается на плоскую поверхность; излишек суспензии снимается и достигается равномерная толщина пленки прохождением пленки под шаблоном. Пленка просушивается с помощью освещения инфракрасными лучами<sup>1</sup>; при толщине пленки 0,10—0,125 мм время сушки около 5 min. После этого пленка погружается в ванну с раствором щелочного калия или уксусно-кислого свинца, делающим ее водостойкой. Едкий калий благодаря обмену основаниями дает материал, который близко подходит по химическому строению к слюде мусковиту; однако уксусно-кислый свинец применяется чаще. Альсифильм изготавливается в виде листов длиной около 900 мм при ширине 450 мм и более; возможно непрерывное получение материала в виде рулонов.

Альсифильм может применяться как заменитель слюды миканита для коллекторных прокладок и других электроизоляционных изделий. Возможно изготовление из него фланцев, хотя по оценке авторов материал в его современном виде не кажется подходящим для формовки. Для штамповки не склоняется тонких листов альсифильма обычно склеиваются вместе шеллаком. Склейенные листы подвергаются горячей прессовке совершенно таким же образом, как это принято для обычного коллекторного миканита на основе натуральной слюды. Хотя отдельные листы альсифильм обладают хрупкостью, склеенный слойстый материал достаточно прочен и может подвергаться обработке. Штамповка происходит без затруднений, но при резке листов на полоски материал легко ломается. Слойстый альсифильм, склеенный на шеллаке, имеет среднюю пробивную напряженность порядка 32 kV/mm, что для практических целей вполне достаточно.

Помимо чистого альсифильма, возможно применение композиций с текстильными материалами (лакоткань с применением альсифильма в качестве пропитывающего вещества), стеклянным волокном, асбестом и др. материалами.

Канд. техн. наук Б. М. ТАРЕЕВ

Предварительное сообщение о работах Лаборатории электроматериалов МЭИ в области бентонитовых и электроизоляционных материалов напечатано в журнале «Электричество» № 9, 1940.

Особый интерес представляют работы в этой области Института минерального сырья.

Б. Т.

**T. Hausep.** Анилиновые смолы в электротехнике. *Helios, стр. 212, № 9, 1940.*

В последнее время наряду с обычными смолами бакелитовой группы (продукты конденсации фенола или крезола с формальдегидом) в электроизоляционной технике стали широко применяться продукты конденсации анилина с формальдегидом. Смолы на основе анилина представляют ряд существенных преимуществ по сравнению с фенольноформальдегидными смолами. При их прессовке отсутствует выделение ускорителей полимеризации, например, амиака. Они не об-

<sup>1</sup> Сушка лаков с помощью инфракрасного облучения в последнее время приобретает все большее распространение. В иностранных журналах за последнее время на эту тему появился ряд статей. (Прим. реф.)

ладают хрупкостью, свойственной бакелитовым смолам; поэтому вполне возможно прессование электроизоляционных деталей из чистой смолы, без наполнителя, что снижает гигроскопичность пластмассы. В отношении образования поверхностной проводимости при действии поверхностных разрядов эти смолы значительно лучше бакелита и приближаются в этом отношении к дефицитному шеллаку.

Средние значения свойств чистой анилиновой смолы: удельный вес 1,20—1,22; прочность на разрыв 600—700 kg/cm<sup>2</sup>, на статический изгиб 1200 kg/cm<sup>2</sup>; удельная ударная вязкость 20—25 kg·cm/cm<sup>2</sup>; модуль упругости 25 000—30 000 kg/cm<sup>2</sup>; температура Мартенса 115° С; балл жаростойкости —3; как поверхностное, так и внутреннее сопротивление более 10<sup>12</sup> Ω; диэлектрическая проницаемость 3—4; tg δ при 50 Hz: при 25° С — 0,01—0,02, а при 90° С — 0,02—0,12; tg δ при радиочастотах: при 25° С — 0,0015—0,003, а при 90° С — 0,002—0,01; средняя пробивная напряженность электрического поля (под маслом, при частоте 50 Hz и температуре 90° С, при толщине слоя диэлектрика 7 mm) не менее 10 kV/mm; водопоглощение при 20° С: за 1 сутки 0,05%, за 7 суток 0,14%, а при 95° С: за 6 h 0,3% и за 12 h — 0,8% (по весу).

Анилиновые смолы с успехом могут применяться также для изготовления слоистых бумажно-смоляных изделий, наподобие гетинакса, обладающих высокими свойствами.

Канд. техн. наук Б. М. ТАРЕЕВ

#### H. Roelig. Испытания синтетических каучуков. *Kunststoffe* стр. 164, № 6, 1940.

В связи с большим значением, которое приобрели в современной электроизоляционной технике различные виды синтетических каучуков, представляется интерес приводимое описание методики испытания этих материалов и сводки средних значений их свойств. Приводим на рис. 1 значения tg δ

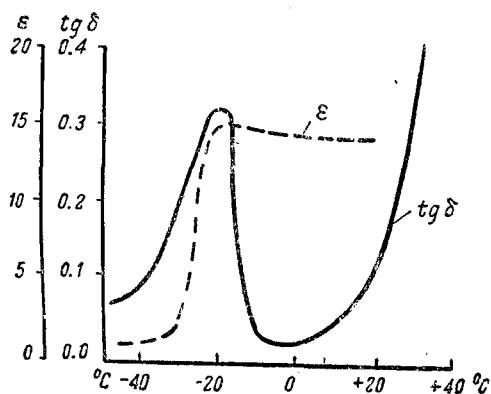


Рис. 1

и ε в функциях температуры для электроизоляционного каучука Perbunan Extra (смешанные полимеры дивинила и акрилнитрила). Из рис. 1 следует, что пербуаны ведут себя как типичные дипольные диэлектрики с дипольным максимумом потерь в температурной области ниже 0° С.

Канд. техн. наук Б. М. ТАРЕЕВ

#### P. Paselli. Применение полихлорвинаила в электротехнике *L'Elettrotecnica*, стр. 100 D, № 14, 1940; *Materie plastiche* стр. 11—23, № 1, 1940.

К числу новых синтетических смолообразных продуктов, широко применяемых за последнее время в электротехнике в качестве электроизоляционных и антикоррозийных материалов, принадлежит продукт полимеризации хлористого винила ( $\text{CH}_2 = \text{CH} \cdot \text{Cl}$ )<sub>n</sub>, называемый полихлорвинилом или поливинилхлоридом. Это — термопластический материал; он переводится нагревом в размягченное состояние, причем это изменение обратимо. Удельный вес материала 1,38; временное сопротивление на растяжение 600—630 kg/cm<sup>2</sup>, удельная теплопроводность 0,244; диэлектрическая проницаемость (при 1 000 000 Hz) 3,1—3,5; средняя пробивная напряженность электрического поля порядка 50 kV/mm; tg δ (при 800 Hz и 20—25° С) 0,015—0,02; удельное объемное сопротивление более 10<sup>14</sup> Ω·см. Материал устойчив по отношению к действию озона, минеральных и растительных масел, жегорюч,

может окрашиваться в любые цвета. Хорошими свойствами, помимо чистого полимера винилхлорида, обладает также смешанный полимер винилхлорида и винилацетата. В материала, смотря по назначению, вводятся различные наполнители (кремнезем, тальк, реже асбест и т. п.) и пластификаторы, повышающие эластичность смеси. Пластифицированный хлорвинил применяется для изоляции проводов (взамен резины, гуттаперчи и пр.), для образования защитных водонепроницаемых оболочек кабелей (взамен свинца), в виде листового материала и трубок для различных надобностей электроизоляционной техники. Использование полихлорвинала вместо свинца в кабельных оболочках представляет следующие преимущества: существенный экономический эффект и замену дефицитного цветного металла; значительное уменьшение веса кабеля; стойкость по отношению к коррозии, в частности, к вибрационной коррозии (как известно, свинец легко разрушается при вибрациях, в особенности при несколько повышенных температурах), а также устранение гальванической коррозии.

Канд. техн. наук Б. М. ТАРЕЕВ

#### W. Weber и M. Pfeifer. Значение цвета глазури изоляторов. *ETZ*, стр. 561—564, Heft 25, 1940.

Статистика показывает, что большое число перекрытий изоляторов воздушных линий электропередач имеет место в утренние часы, вскоре после восхода солнца. Это объясняется тем, что в утренние часы повышение температуры изоляторов отстает от повышения температуры воздуха и поэтому на поверхности изоляторов конденсируются пары воды. Конденсированная влага особенно опасна при наличии загрязненной поверхности изоляторов.

Как физические соображения, так и проведенные авторами специальные эксперименты показывают, что при освещении солнцем быстрее всего нагреваются темные (коричневые и, в особенности, черные) изоляторы, медленнее — зеленые и еще медленнее — белые. Поэтому темная глазурь с точки зрения уменьшения опасности перекрытия изоляторов является наиболее целесообразной.

Канд. техн. наук Б. М. ТАРЕЕВ

#### Сварочные аппараты для пластмасс. *Chemiker Zeitung*, стр. 48, № 9—10, 1940.

В последнее время для обработки термопластичных пластмасс (винилур, мицопол, астрапол, игелит, деделит, плексиглас и др. виниловые и акриловые массы и пр.) широко применяется метод «сварки», аналогичный сварке металлов. При сварке изделия из пластмасс нагреваются до температуры порядка 200—230° С, соответствующей сильному размягчению массы, и затем прочно соединяются друг с другом, изгибаются и т. п. Сварка находит себе применение для соединения кабельных оболочек, трубопроводов и др. Описываются специальные сварочные аппараты для термопластов как с электрическим нагревом, так и со скжиганием газа (водород, ацетилен или светильный газ). Пламя не должно непосредственно соприкасаться со свариваемыми деталями: на последние действует струя горячего воздуха.

Канд. техн. наук Б. М. ТАРЕЕВ

## ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

#### E. E. Chatton, H. S. Hubbard. Прецизионная рентгеновская установка на 1 400 000 V. *GÉR*, стр. 271—279, № 7, 1940.

За последние два-три года создан ряд рентгеновских установок, работающих при напряжениях свыше миллиона вольт. Между тем методика измерения интенсивности рентгеновского излучения, нормы техники безопасности по защите обслуживающего персонала от излучения, техника дозирования рентгеновского излучения и т. д. разработаны лишь для установок с напряжением до 400 kV.

Для ликвидации этого разрыва и выработки соответствующих норм и стандартов Вашингтонское Bureau of Standards построило рентгеновскую установку, позволяющую поддерживать строго стабильный режим рентгеновской трубы (что необходимо при точных измерениях) в интервале напряжений от 400 до 1 400 kV и токе до 15 mA.

Вся установка состоит из десятикаскадной высоковольтной установки, десятисекционной рентгеновской трубы и прецизионного потенциометра постоянного тока, позволяющего измерять напряжение до 1400 kV.

Десять одинаковых каскадов по 140 kV каждый собраны по схеме удвоения Латур-Грейнажера.

Отдельный каскад состоит из трансформатора на 66 kV, который снабжен дополнительной обмоткой симметричной первичной и служащей для питания следующего каскада, двух конденсаторов по 70 kV 0,1 μF, двух кенотронов и трансформатора накала кенотронов.

Все эти детали помещены в наполненном маслом баке из гермита диаметром около 1250 mm и высотой около 800 mm, который снабжен окошками для контроля работы кенотронов. Линия трансформаторов накала кенотронов питается непосредственно от сети 60 Hz, а линия трансформаторов напряжения от стабилизированного генератора вращающегося синхронным двигателем. Наличие больших емкостей в схеме удвоения позволяет получать очень стабильное напряжение. Волнистость выпрямленного тока составляет меньше 0,1% на мА нагрузки при напряжении в 1400 kV.

Общая высота всей установки — 9300 mm.

Для измерения напряжения служит прецизионный микромперметр, соединенный последовательно с измерительным сопротивлением около  $3 \cdot 10^{10} \Omega$ .

Для устранения потерь на корону в сопротивлении последнее помещено в секционированный чехол, вдоль которого задано принудительное распределение потенциала. Последнее достигнуто присоединением секций чехла к соответствующим секциям высоковольтной установки.

Рентгеновская трубка имеет горячий вольфрамовый катод и работает при непрерывной откачке. Антикатодом служит вольфрамовая пластинка толщиной около 3 mm, приваренная к охлаждаемому водой медному блоку. Окошко для выпуска рентгеновских лучей также охлаждается водой.

Поскольку электронный шуп должен пройти на пути от катода к аноду (около 8000 mm) через ряд относительно малых диафрагм в ускоряющих электродах, пришлось для его фокусировки применить методы электронной оптики. В реферируемой статье приведены также некоторые детали устройства рентгеновской трубы.

Инж. А. И. ФРОЙМАН

## O. Schenckrich. Новый метод измерения интегральных величин. Arch. f. El., стр. 415—423, Heft 7, 1940.

Идея метода состоит в том, что измерение суммы сводится к измерению числа равных импульсов известной величины за определенный промежуток времени. Простейшая электрическая схема, с помощью которой может быть выполнено такое преобразование, представлена на рисунке.

Параметры схемы подбираются такими, чтобы время заряда конденсатора было ничтожно мало по сравнению со временем разряда, и напряжение на конденсаторе колебалось в небольших пределах.

Заряд, отдаваемый конденсатором за время  $T$ , определяется при указанных условиях следующим выражением:

$$Q = \Sigma \Delta Q \approx U_{cp} \cdot \int_0^T \frac{dt}{R(t)},$$

где  $U_{cp}$  — среднее напряжение на конденсаторе.

Иначе можно написать:

$$Q \equiv f'$$

где  $f'$  — число разрядных импульсов за время  $T$ .

Сравнивая оба выражения для  $Q$ , получим:

$$f' \equiv Q \approx U_{cp} \cdot \int_0^T \frac{dt}{R(t)}. \quad (1)$$

Если сопротивление  $R(t)$  изменяется обратно пропорционально измеряемой величине, то как показывает выражение (1), число разрядных импульсов пропорционально интегралу от этой величины по времени, а средняя частота импульсов соответствует среднему значению измеряемой величины за тот же промежуток времени.

Описанный метод может быть применен для определения пути по скорости, расхода газа или жидкости по скорости течения и т. п.

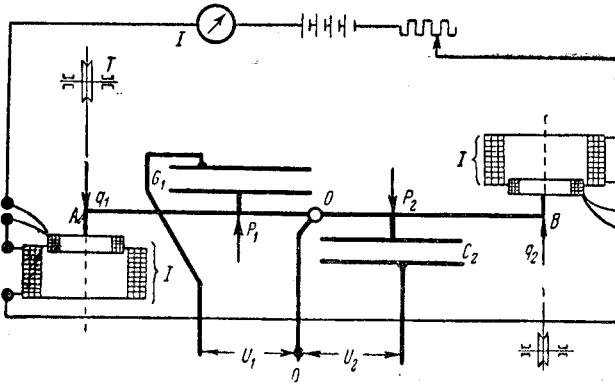
В реферируемой статье кратко излагается теория нового метода и намечаются пути его развития.

Инж. М. С. ЛИБКИНД

## H. Böcker. Электростатические вольтметры высокого напряжения. ETZ, стр. 729—733, Heft 32, 1940.

Электростатические измерения высокого напряжения могут быть абсолютными или относительными. Абсолютные измерения напряжения производятся при помощи гирь и масштаба. При относительных измерениях данное напряжение сравнивается с известными напряжениями трансформаторов, делителей напряжения, абсолютных измерительных приборов и шаровых разрядников. При электростатических измерениях притяжение подвижного электрода, находящегося в электрическом поле, используется для передвижения стрелки или светового пятна.

Томсону удалось впервые осуществить точные абсолютные измерения высоких напряжений, используя экранированный дисковый конденсатор. Одна из пластин конденсатора Томсона имеет в середине вырез, в котором помещается в той же плоскости собственно измерительный диск. Наружное кольцо является экраном, сохраняющим постоянство электрического поля в пределах измерительного диска.



Принципиальная схема электростатического вольтметра:  $A - O - B$  — весы Томсона;  $C_1, C_2$  — экранированные конденсаторы;  $T$  — ролики для подвески противовесов,  $U_1$  и  $U_2$  — измеряемые напряжения

При атмосферном давлении для 200 kV<sub>eff</sub> требуется расстояние между пластинами не менее 20 см, диаметр измерительного диска — 15 см при наружном диаметре кольца — 1 м. При 500 kV диаметр кольца получается в 3 м, а расстояние между электродами достигает 75 см. При этом усилие на диске равняется только около 0,04 g/cm<sup>2</sup>. При помощи таких конденсаторов точные абсолютные измерения напряжения могут быть произведены до 200 kV, а при помещении конденсаторов в сосуды с сжатым газом — до 500 kV.

В статье дается описание целого ряда приборов: 1) Абсолютного вольтметра на 275 kV, дающего ошибку только в 0,01%. 2) Абсолютного вольтметра Пальма до 300 kV (в камере с углекислым газом). 3) Абсолютного вольтметра Rogowski и Böcker на 450 kV. 4) Шарового вольтметра Hüter для относительных измерений напряжений до 1000 kV (с верхним шаром, опускающимся под влиянием электростатического напряжения). 5) Вольтметра на 1000 kV (с индукционным передатчиком). Диаметр электрода такого вольтметра — 1 м, высота изолиторов 3,5 м. 6) Вольтметров Starke и Schröder до 500 kV.

Принципиальная схема электростатического вольтметра до 300 kV представлена на рис. 1.

Инж. Л. Б. БРОУДЕ

## Пульт для испытания кабеля. ETZ, стр. 15, Heft 36, 1940.

Для испытания уложенных кабелей с бумажной изоляцией AEG разработаны передвижные пульты на напряжение 5, 15 и 25 kV.

До 5 kV пульты изготавливаются с сухим выпрямителем; для более высоких напряжений применяется кенотрон. Мощность пульта ограничена 1 kW.

Наряду с определением слабых мест изоляции с помощью пульта возможно также и определение местоположения дефекта кабеля.

Инж. П. П. ХРАМОВ

W. Estorff u. W. Weber. „Противотуманные“ типы изоляторов для наружных установок. *ETZ*, стр. 645—648, *Heft 23*, 1940 и стр. 669—673, *Heft 29*, 1940.

Авторы описывают результаты испытаний изоляторов в лабораторных и частично в естественных условиях загрязнения. В лабораторной обстановке были испытаны 8 типов опорных изоляторов и 2 типа подвесных.

Все изоляторы предназначены для рабочего напряжения 120 kV, электрическое расстояние в свету для опорных изоляторов было одинаково и равно 120 mm.

Описываемые испытания произведены с искусственным загрязнением, топочным уносом бурого угля, дающего пыль, содержащую растворимые в воде соли, и выпадающего в виде крупнозернистой каменноугольной золы. 10% зерен были крупнее 0,3 mm, 30% — крупнее 0,2 mm и 80% — крупнее 0,1 mm.

Перед началом опытов изоляторы выдерживались в ходильнике свыше 20—30 min, времени, в течение которого температура фарфора падала до 2—6°. Затем изоляторы переносились в испытательное помещение, в котором посредством впуска пара была достигнута 100% влажность при 20—30°. Затем к изолятору прикладывается 60 kV, а в верхнюю часть помещения на каждый цикл загрязнения в течение 16 min впускается, посредством сжатого воздуха, 250 g угольной пыли.

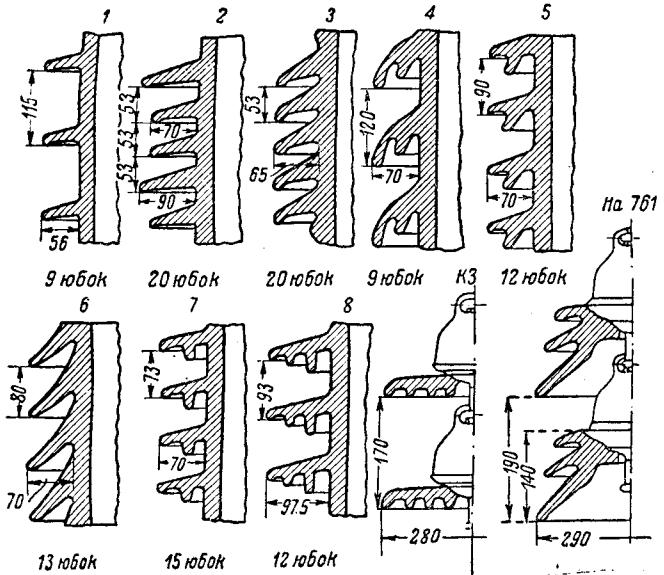


Рис. 1. Форма юбок испытанных изоляторов

Изоляторы выдерживаются 30 min при 60 kV и 10 min при 100 kV.

Опыты показали, что загрязнение оказывает наименьшее влияние на 12 и 15-юбочные изоляторы (5, 7 и 8 на рисунке). Этот результат достигнут планомерным устройством защищенных пространств, что оказалось более эффективным, чем увеличение числа и вылета юбок. Расстояние между юбками не должно быть слишком малым, а защищенное пространство — слишком узким. Из опытов установлено, что дуга, возникшая в углублении, остается прижатой к поверхности, если глубина углубления не больше 1,4-кратной ширины.

Эти типы изоляторов называются противотуманными.

Изоляторы 2—6 были испытаны в естественных условиях загрязнения уносами большой немецкой электростанции, работающей на буром угле. Изоляторы были установлены на крыше трансформаторной подстанции высотой 15 m в особенно сильных условиях загрязнения. Изоляторы были подвергнуты в течение 6 недель этому загрязнению и затем, кроме того, стояли три недели под напряжением 60 kV относительно земли.

После окончания процесса загрязнения изоляторы были отправлены на испытание, где с них были сняты V-образные кривые. Значения, полученные при естественном загрязнении, лежали примерно на 15% ниже, чем при лабораторном загрязнении.

Автор считает, что изоляторы типов 5, 7 и 8 позволяют значительно увеличить срок между чистками изоляторов (до одного года).

Инж. Е. В. КАЛИНИН

## СВЕТОТЕХНИКА

S. G. Hibben. С лампой вокруг света. *Illum. Eng., стр. 477, № 6, 1940.*

В США за прошлый год было выпущено свыше 540 млн. ламп накаливания, не считая миниатюрных.

Перед Европейской войной потребление ламп на душу составляло: для США — 4,6, Канады — 2,5, Западной Европы около 1 и среднее мировое — 0,8. Два года назад среднее мировое потребление миниатюрных ламп было 0,5 лампы на душу, а для США около 3,6. Соотношение между потреблением обычных и миниатюрных ламп, к которым относятся, например, автомобильные лампы, стоит в зависимости от развития средств сообщения, в частности, автотранспорта. В 1937 г. из общего числа ламп на долю миниатюрных в США приходилось 46%. Это соотношение существенно не изменилось до настоящего времени. Резкая разница имеет место в сравнении с Западной Европой, где потребление миниатюрных ламп составляет 34%. В заключение указывается на развитие флуоресцирующих ламп, которых в этом году было выпущено около 3,5 млн.

Канд. техн. наук Р. Г. ИЗВЕКОВ

Развитие применения натриевых ламп. *Illum. Eng., стр. 490, № 6, 1940; GER, стр. 158—164, № 4, 1940.*

В конце июня 1940 г. в Нью-Йорке была пущена в эксплуатацию самая крупная в мире осветительная установка с натриевыми лампами, приуроченная к открытию дороги Belt-Parkway.

Осветительная установка имеет протяженность 33 мили и превышает в два раза наиболее крупные существующие установки натриевых ламп. Всего применено свыше 2200 натриевых ламп типа 10 000 In для горизонтального горения в арматурах «биплан». В проездах дороги, для соответствия цветному натриевому освещению, применены лампы накаливания в арматурах с окрашенными в оранжевый цвет колпаками.

Большую целесообразность показал опыт применения натриевых ламп для освещения транспортных туннелей и мостов. В настоящее время в США натриевые лампы 10 000 In установлены на восьми таких крупных объектах (например, освещение моста Сан-Франциско — Оклэнд протяженностью 15 km и др.).

Повышенная экономичность натриевых ламп 55 In/W (против 15—20 In/W для ламп накаливания) дает дешевый свет, позволяет увеличить освещенность дорог и тем самым снизить число аварий и несчастных случаев. Натриевые лампы обладают большим сроком службы по сравнению с лампами накаливания.

Использование натриевых ламп дает от 30 до 80% снижения годовой стоимости эксплуатации освещения по сравнению с лампами накаливания.

Канд. техн. наук Р. Г. ИЗВЕКОВ

## РАЗНОЕ

Энергетическое топливо будущего. *Power, стр. 56—59, № 7, 1940.*

В январе 1939 г. германские физики O. Hahn и E. Strassman при бомбардировании урана потоком нейтронов обнаружили присутствие элементов, имеющих атомный вес, приблизительно вдвое меньший, нежели атомный вес урана. Узнав об этом открытии, американские физики несколько недель спустя экспериментально подтвердили явление расщепления урана на более легкие элементы с выделением очень больших количеств энергии. В процессе опытов возникло предположение, что преобладающий в исследуемом уране изотоп *U-238* тормозит развитие процесса. Тогда американский физик Nier, применив сильное магнитное поле, выделил в чистом виде все 3 изотопа урана и дал возможность физикам Dunning, Fermi и др. произвести атомное бомбардирование каждого из изотопов в отдельности и показать замечательные свойства изотопа *U-235*.

Во всех лабораториях при этих экспериментах первоначальной задачей было получить очень быстрые снаряды-протоны. Последним сообщали большую скорость в прямолинейном электрическом поле очень высокого напряжения или с по-

мощью особых электромагнитных приборов-циклотронов. Циклотрон сообщал протонам вращательное движение по постепенно разворачивающейся спирали и с возрастающей скоростью. Быстро движущиеся протоны встречали мишень из бериллия, который давал поток нейтронов, уже непосредственно применявшимся для атомной бомбардировки урана. Атом урана — 235 схематически состоит из ядра, образованного 92 протонами и 143 нейtronами, вокруг которого по ряду орбит вращается 92 электрона.

Произведенные исследования показали, что относительно медленный атомный снаряд-нейtron (движущийся не быстрее, чем молекулы воздуха при  $t = 21^\circ\text{C}$ , т. е. со скоростью около 300 м/сек) при встрече с ядром атома  $U-235$  взрывает последний. В результате «тяжелый» атом  $U-235$  расщепляется на два атома нового элемента с вдвое меньшим атомным весом. Кроме того, при взрыве с большой скоростью вылетают 2, 3 или 4 нейтрона. Энергия этих частиц, возникших в результате взрыва, оказывается в несколько миллиардов раз большей, нежели энергия вначале примененного снаряда. При этом оказывается, что именно очень медленный атомный снаряд (а не быстрый, как в экспериментах с другими элементами) легче всего взрывает атом  $U-235$ . Движущиеся осколки атомного взрыва могут быть легко остановлены материальным барьера. Они нагревают этот барьер, отдавая свою энергию в виде обычного ощущимого тепла, совершенно так, как это происходит в случае сгорания угля. Полученная атомная энергия является результатом превращения массы в энергию: около 0,1% массы исчезает в этом превращении.

Произведенные исследования показали, что процесс расщепления  $U-235$  не является саморазвивающимся, так как скорость нейтронов, вылетающих из расщепленного атома, слишком велика для того, чтобы взорвать встречающиеся им на пути атомы  $U-235$ . Однако скорость нейтронов может быть понижена искусственно. Для этого удобно применить воду; водородные атомы в слое воды являются лучшим средством торможения. Произведенные эксперименты позволяют предполагать, что неприостанавливющийся процесс может протекать лишь в относительно большой массе  $U-235$ , повидимому не менее 2,5—25 kg, возможно даже при отсутствии искусственного внешнего побудителя, так как действия нейтронов, всегда присутствующих в природных космических лучах, может оказаться достаточным для начала процесса. Таким образом при этом решении следует лишь перфорировать массу  $U-235$  и заполнить отверстия и полости водой. В случае же возникновения нежелательных, чрезвычайно интенсивных темпов распада атомов повысится выделение тепла, вода испарится и изменится во внутренних полостях перегретым паром, который уже не будет в состоянии тормозить движение нейтронов,

и процесс распада, таким образом, автоматически приостановится.

Если каждый атом в 1 kg  $U-235$  будет таким образом взорван, то количество тепла, выделенного для внешнего применения, составит  $20 \cdot 10^9$  cal. Таким образом  $U-235$  как топливо в данном случае эквивалентен 1370 т каменного угля теплоизводительностью 3400 cal. Посредством этого тепла, прямо или косвенно, может быть получен пар в количестве, способном выработать 2700 MWh электроэнергии при современном паротурбинном оборудовании с к. п. д. 0,25.

Промышленный урановой рудой является «урановая смолка», которая добывается в Западной Канаде, в Австралии, в Бельгийском Конго и в Германии. Закись-окись урана ( $\text{U}_3\text{Os}$ ) в урановой смолке содержится в количестве от 65 до 90%. Неразрешенной пока и чрезвычайно трудной задачей является разработка коммерчески приемлемой технологической схемы отделения  $U-235$  от  $U-234$  и  $U-238$ , с которыми первый тесно соединен в природе. Металлический уран обычно содержит изотопы  $U-234$  — около 0,006%,  $U-235$  — 0,7% и  $U-238$  — более 99%. Есть все основания предполагать, что сама по себе сложная техническая задача передачи атомного тепла рабочему телу окажется все же менее трудной, нежели проблема выделения изотопа  $U-235$  в чистом виде.

Это обстоятельство более чем какое-либо другое может отложить на десятилетия использование  $U-235$  как энергетического топлива. Рыночная стоимость металлического урана при возросшем спросе на него должна составить около 20 долл. за kg. Отсюда стоимость изотопа  $U-235$  даже без учета затрат на его выделение превзойдет 2000 долл. за kg.

Вследствие исключительной концентрации энергии  $U-235$  представляется многообещающим топливом будущего для отопления и нагрева в быту, а также как заменитель горючего для аэропланов, автомобилей, судов и т. д. По данным реферируемой статьи, в домашнем хозяйстве 10 t каменного угля смогут быть заменены 3,2 g урана. Автомобиль, который пробегает на 1 l газolina 6,5 km, сможет пробегать при том же к. п. д. теплового цикла около 14 млн. km на 1 kg урана.

В области мощных тепловых электростанций использование  $U-235$ , повидимому, не сможет вызвать особенно крупного переворота, так как даже в том случае, если условно совершенно не учитывать стоимость затрачиваемого урана, может отпасть лишь топливная слагающая себестоимости электроэнергии, составляющая для современных крупных электростанций около половины ее полной стоимости.

Применение внутриатомной энергии урана представляется в реферируемой статье практически вероятным.

Канд. техн. наук Н. А. КАРАУЛОВ



#### ПОПРАВКА

- № 11 «Электричество» 1940 г. в статье А. В. Крикунчик следует читать:  
На 46 стр., 23 строка сверху, правая колонка — последнем пятiletии  
» 47 » 2 » » (в табл. общее  
» 48 » 24 » » левая колонка — восстановлении напряжения в сети  
» 52 » 1 » » правая » — (гидромуфты) в той схеме, в какой  
» 53 » 3 » » левая » они нашли широкое применение,  
число котлов) — 39  
были впервые предложены  
— отдельными моторгенераторами

Редактор инж. Я. А. КЛИМОВИЦКИЙ

Л13229.

Подписано к печати 29/1 1941 г.  
Цена 5 руб. Заказ 3880.

Печ. л. 10. Авт. л. 14

В 1 п. л. 60307 зн.  
Тираж 10 000 экз.

13-я тип. ОГИЗа РСФСР треста «Полиграфкнига». Москва, Денисовский, 30.

Вологодская областная универсальная научная библиотека

www.booksite.ru

# W. V. NEDERLANDSCHE KABELFABRIEK

DELFT (Голландия)

■ ■ ■ ■

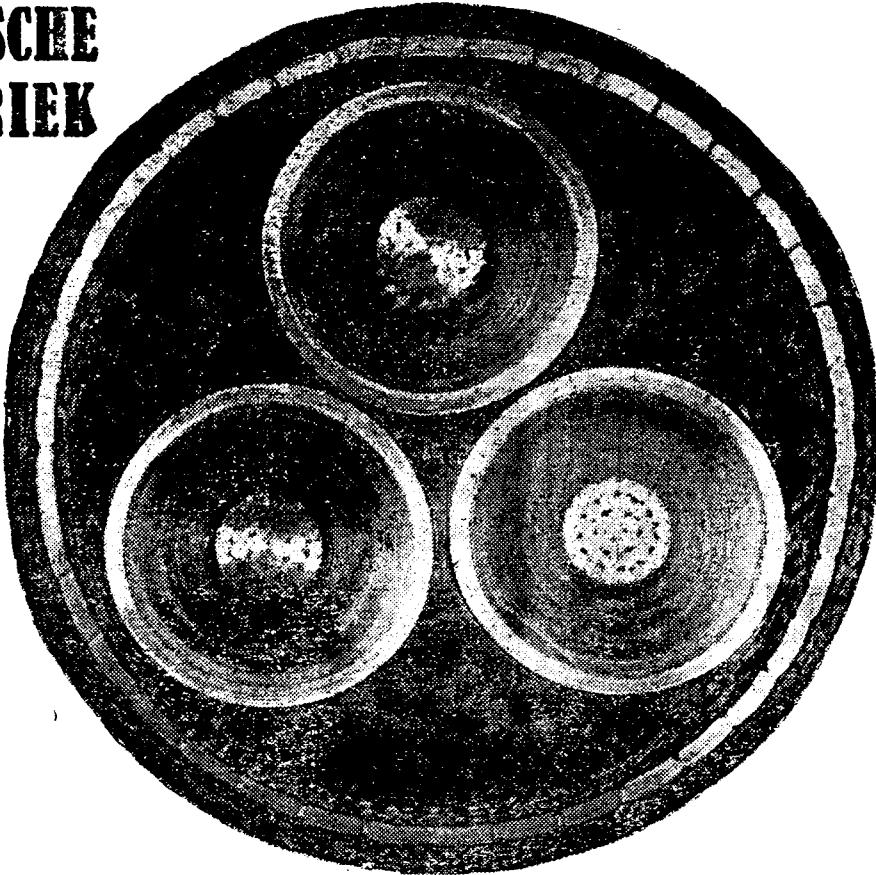
## ПРОИЗВОДЯТ:

Подземные электрические  
кабели высокого и низкого  
напряжения с бумажной  
изоляцией

Подземные телефонные и  
сигнализационные кабели

Подводные кабели

Неизолированную проволоку  
и неизолированные кабели  
из электролитической меди



Выписка заграничных товаров может последовать лишь на основании действующих в СССР правил о монополии внешней торговли.

## ВНИМАНИЮ ПОДПИСЧИКОВ

**ВЫПИСЫВАЙТЕ НЕДОСТАЮЩИЕ У ВАС ОТДЕЛЬНЫЕ НОМЕРА ЖУРНАЛОВ**  
*В издательстве имеются следующие отдельные номера журналов за 1940 г.*

|  | Цена отдельного<br>номера |
|--|---------------------------|
| „ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“ №№ 7, 8, 9, 10, 11 и 12  | 5 руб.                    |
| „ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ“ №№ 7, 8, 9, 10, 11 и 12  | 3 р. 50 к.                |
| „ВЕСТИК ВЛКСПРМЫШЛЕННОСТИ“ №№ 7, 8, 9, 10, 11 и 12   | 4 р. 50 к.                |
| „ТЕПЛОСИЛОВОЕ ХОЗЯЙСТВО“ №№ 7, 8, 9, 10, 11 и 12   | 4 руб.                    |
| „ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО“ №№ 7, 8, 9, 10, 11 и 12                                       | 3 р. 50 к.                |
| „РАБОЧИЙ ЭНЕРГЕТИК“ №№ 7, 8, 9, 10 и 11  | 1 руб.                    |
| „БЮЛЛЕТЕНЬ ВСЕСОЮЗНОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА“<br>№№ 7, 8 и 9                           | 3 руб.                    |
| „ИЗВЕСТИЯ ВСЕСОЮЗНОГО ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА<br>ИМ. ДЗЕРЖИНСКОГО“ №№ 7, 8, 9, 10, 11 и 12 | 4 руб.                    |
| „ИЗВЕСТИЯ ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ СЛАБОГО ТОКА“ №№ 9,<br>10, 11 и 12                             | 3 руб.                    |
| „СОВЕТСКОЕ КОТЛОТУРБОСТРОЕНИЕ“ №№ 7, 8, 9, 10, 11 и 12   | 3 руб.                    |

*Журналы высыпаются по получении полной стоимости*

Заказы и деньги направлять по адресу: Москва, 12, проезд Владимира, 4 — ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

Цена 5 руб.

# ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МОСКВА, ПРОЕЗД ВЛАДИМИРОВА, 4.

ПРОДОЛЖАЕТСЯ ПОДПИСКА на 1941 г.

НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЖУРНАЛЫ

| НАЗВАНИЕ ЖУРНАЛОВ   | Количество<br>номеров<br>в год | Подписная цена |            |
|---|--------------------------------|----------------|------------|
|   |                                | На год         | На 6 м-цев |
| „ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“   | 12                             | 60 руб.        | 30 руб.    |
| „ТОРФЯНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ“   | 6                              | 12 „           | 6 „        |
| „ВЕСТНИК ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ“                                     | 12                             | 54 „           | 27 „       |
| „ТЕПЛОСИЛОВОЕ ХОЗЯЙСТВО“  | 12                             | 48 „           | 24 „       |
| „ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО“                                    | 12                             | 48 „           | 24 „       |
| „ИЗВЕСТИЯ ВСЕСОЮЗНОГО ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА им. ДЗЕРЖИНСКОГО“ | 12                             | 48 „           | 24 „       |
| „БЮЛЛЕТЕНЬ ВСЕСОЮЗНОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА“ (ВЗИ)         | 12                             | 36 „           | 18 „       |
| „ИЗВЕСТИЯ ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ СЛАБОГО ТОКА“                       | 12                             | 48 „           | 24 „       |

## ПОДПИСКА ПРИНИМАЕТСЯ:

отделениями и организаторами подписки „Союзпечать“ на предприятиях, в учреждениях и всюду на почте.

ПОДПИСКУ МОЖНО НАПРАВЛЯТЬ также по адресу:

Москва, проезд Владимира, 4, Госэнергоиздат.  
Расчетный счет № 188002 в Красногвардейском  
отделении Госбанка.

СВОЕВРЕМЕННАЯ ПОДПИСКА ОБЕСПЕЧИВАЕТ БЕСПЕРЕННУЮ И АККУРАТНУЮ ДОСТАВКУ ЖУРНАЛОВ.