

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

3

1946

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

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

СОДЕРЖАНИЕ

<i>К. А. Круг</i> —Проблема передачи электроэнергии на сверхдальние расстояния	3
<i>Б. М. Вул</i> —Вещества с высокой и сверхвысокой диэлектрической проницаемостью	12
<i>Н. Ф. Волощенко</i> —Влияние барьеров на электрическую прочность воздушных промежутков	21
<i>Н. А. Карякин</i> —Эффект высокой интенсивности в вольтовой дуге постоянного тока между угловыми электродами	27
<i>Л. И. Гутенмахер, И. С. Градштейн, В. А. Тафт</i> —Электрическое моделирование физических процессов при помощи матричных схем с усилителями	35
<i>Л. И. Гутенмахер, И. С. Градштейн, Н. В. Корольков, В. А. Тафт</i> —К статье И. С. Брука	40
<i>А. Г. Иосифьян, Б. М. Каган, Н. Н. Шереметьевский</i> —Теория амплитудно-вольтовой синхронно-следающей системы	41
<i>В. Т. Быбышев</i> —Современные тенденции и задачи в области электрооборудования металлорежущих станков	48
<i>И. Р. Фрейдзон</i> —Электрическое оборудование гребной установки турбоэлектроходов „Иосиф Сталин“ и „Вячеслав Молотов“	54
<i>П. С. Жданов, В. А. Веников</i> —Устойчивость электрических систем при перегрузках	60
<i>С. Б. Юдицкий, С. Ю. Нэмчин</i> —Влагостойкость и водостойкость твердых выпрямителей	64
<i>Е. И. Дмитриев</i> —Расчет фигурных реостатов	67
<i>М. А. Лаврухин</i> —Работа электросчетчиков при низкой температуре	72
<i>Н. Г. Гейнин</i> —Оптимальное местоположение узловой точки в трехлучевых схемах электросетей	76
<i>М. Д. Трейвас</i> —Игнитроны на электрифицированном транспорте	79
<i>И. С. Стекольников</i> —Сверхмощный генератор импульсных токов	81
<i>В. Л. Фабрикант</i> —Применение симметричных составляющих к трехфазным системам в свете теории Крона	82
<i>А. Я. Вайнберг</i> —Электрический индикатор газрыва газозвод	83
<i>М. П. Костенко, В. К. Попов, И. Н. Рабинович</i> —Обсуждение статьи Е. Я. Казовского	85
Хроника	87
Библиография	90
Рефераты	91



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Академик **Б. Е. Веденеев** (отв. редактор), член-корр. АН СССР
А. И. Берг, доктор техн. наук, проф. **Ю. В. Бутневич**, доктор техн. наук,
проф. **А. А. Глазунов**, член-корр. АН СССР **М. П. Костенко**, академик
В. Ф. Миткевич, академик **Н. Д. Папалекси**, доктор техн. наук, проф.
Г. Н. Петров, канд. техн. наук **И. А. Сыромятников**, инж. **А. И. Товсто-**
палов, член-корр. АН СССР **М. А. Шателен**

Ответственный секретарь инж. **Я. А. Климовицкий**

Адрес редакции: Москва, проезд Владимирова, 4, тел. К 5-21-22
Адрес для корреспонденции: Москва. Главный почтамт, почтовый ящик № 648

Проблема передачи электроэнергии на сверхдальние расстояния

Член-корреспондент Академии наук СССР К. А. КРУГ

Московский энергетический институт им. Молотова

В процессе развития электрификации СССР, в поисках мощных и дешевых источников энергии мы все чаще обращаем внимание на неисчерпаемые ресурсы водной энергии, которыми так богата наша страна.

Однако использование наиболее мощных из этих источников, расположенных вдали от старых промышленных центров и густо населенных районов страны на многие сотни километров, связано с возможностью создания электропередачи на сверхдальние расстояния.

Еще Марсель Депре показал, что, повышая напряжение, можно любое количество энергии передать на любое расстояние. Система трехфазного тока высокого напряжения позволяла до сих пор передавать вполне надежно и рентабельно энергию на достаточно большие расстояния. Однако в использовании системы трехфазного тока уже подошли к пределам ее возможностей.

Два обстоятельства тормозят применение трехфазного тока для передачи больших мощностей на сверхдальние расстояния — изоляция электропередачи и устойчивость системы.

При больших передаваемых мощностях и дальних расстояниях в целях снижения стоимости передачи и потерь в ней избегают применения большого числа параллельных цепей, предпочитая повышать напряжение в линии. Это в свою очередь требует повышенной изоляции трансформаторов, станционной аппаратуры и линии. Уровень изоляции отдельных частей передачи зависит от того, какое напряжение эти части могут получать при авариях. Например, чтобы избежать при заземлении одной фазы длительных перенапряжений и чрезмерных потерь на корону, в установках порядка 220 кВ и выше отказываются от дугогасящих катушек (Петерсена и других) и наглухо заземляют нейтральные точки.

Наиболее сложно дело обстоит с изоляцией трансформаторов. Даже при заземленной ней-

Передача энергии постоянным током высокого напряжения является одной из центральных современных проблем преобразования и передачи электроэнергии. С решением этой проблемы связаны возможности передачи больших мощностей от весьма отдаленных источников дешевой энергии в промышленные районы страны. После обзора достигнутого уровня в передаче больших мощностей трехфазным током рассмотрены основные задачи передачи электроэнергии постоянным током. В заключение дан перечень сравнительных преимуществ и указаны недостатки новой системы. Статья является изложением доклада автора на научной сессии МЭИ в январе 1946 г.

трали надлежащая изоляция обмоток, и особенно выводов, требует при повышенных напряжениях значительного увеличения размеров трансформатора и затраты материалов. Правильное распределение электрических полей и изоляционных барьеров внутри трансформаторов и более интенсивное охлаждение,

а также переход к пятистержневым сердечникам позволили за последнее время снизить габариты трансформаторов до размеров, допускающих транспортировку по железным дорогам сверхмощных трансформаторов в собранном виде. Заземление нейтрали имеет для трансформаторов еще то преимущество, что изоляция высоковольтной обмотки может быть осуществлена ступенями с усилением входных витков.

Опасность последствий однофазных коротких замыканий в настоящее время может быть в значительной степени снижена соответствующим устройством селективной защиты и выключателей, позволяющих отключать короткие замыкания в течение десятой доли секунды. Осуществление быстрого автоматического повторного включения в значительной степени устраняет влияние таких коротких замыканий на бесперебойность электроснабжения.

Наиболее уязвимым элементом станционной аппаратуры являются выключатели. Применение большого числа разрывов в выключателях с одновременным сильным масляным дутьем позволяет, как это было сделано для установки в Boulder-dam, строить выключатели с временем отключения в 0,05 sec, на такие напряжения линии, как 287 кВ, и на разрывную мощность в 2,5 млн. кВА. При дальнейшем повышении напряжения и увеличении разрывной мощности могут встретиться затруднения, в частности в том отношении, что деионизация газов в промежутках будет протекать не так быстро и нельзя будет выдержать такого времени отключения. Вопрос с остальной станционной аппаратурой решается сравнительно просто. Измерительные

трансформаторы на высокое напряжение можно не ставить, вместо них можно разместить соответствующую обмотку в силовых трансформаторах, разъединители и выключатели устанавливаются на опорных изоляторах, и при открытых подстанциях можно обойтись без проходных ступок.

При напряжениях в 220 кВ и выше приходится при выборе проводов для линий отказываться от сплошных сечений и переходить к полым проводам во избежание, с одной стороны, излишних потерь на скин-эффект и, с другой, — на корону. При одних и тех же значениях тока потери на джоулево тепло при переменном токе частоты 50 Гц превышают потери при постоянном токе при внешнем диаметре медного провода в 25 мм на 4%, при 35 мм — на 8% и при 50 мм на 42%. Толщину стенок полых проводов делают не меньше 3 мм по условиям механической прочности и не больше 5 мм, так как дальнейшее увеличение толщины стенок скажется уже на потерях на скин-эффект. Заземление нейтрали облегчает также выбор диаметра проводов с точки зрения короны. В противном случае, например, при применении дугогасящих катушек, необходимо было бы считаться с напряжением, в $\sqrt{3}$ раза большим по отношению к земле. Так, при 400 кВ между проводами пришлось бы увеличить диаметр проводов с 45 мм примерно до 60 мм.

Изоляция проводов и при напряжениях выше 220 кВ не представляет затруднений, если для более равномерного распределения напряжения между отдельными элементами гирлянд снабжать их верхний и нижний концы охраняемыми металлическими кольцами или арматурой в виде рогов на верхнем и так называемой восьмеркой на нижнем конце.

Однако повышение напряжения между проводами требует значительного увеличения расстояния между проводами, во-первых, по соображениям коронного напряжения и диэлектрической прочности проводов по отношению друг к другу, во-вторых, во избежание разрядов и коротких замыканий при схлестывании и «пляске» проводов, при сбросе гололеда и качании их под действием ветра. Так, при 400 кВ расстояние между ними должно быть выбрано равным примерно 10 м, что при горизонтальном расположении проводов дает верхнюю длину перекладины не менее 20 м, а при вертикальном (елочном) расположении проводов и при заземляющем тресе требует доведения высоты линейных мачт до 50—55 м.

В дальнейшем будет показано, какие большие преимущества перед передачей энергии переменным током имеет система передачи энергии постоянным током. Главное преимущество второй системы заключается в отсутствии проблемы устойчивости при передаче энергии постоянным током.

Статическая устойчивость работы электропередачи при постепенном нарастании нагрузки

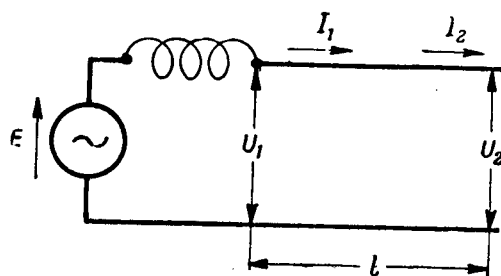


Рис. 1.

определяется возможным предельным значением передаваемой мощности. При превышении этой так называемой предельной статической мощности параллельная работа питающей станции и питаемой системы «разваливается». Обусловлено это явление расхождением векторов э. д. с. генераторов и напряжения на конце линии электропередачи.

Для общей ориентировки в этом сложном вопросе рассмотрим идеальную передачу энергии без активных потерь в линии, в повышающем трансформаторе и генераторе (рис. 1). В этом случае при холостом ходе и при коротком замыкании получаются в линии стоячие волны напряжения и тока. Напряжения и токи в каждой точке сдвинуты на 90° , между ними в начале и в конце линии существует следующая связь (см. «Основы электротехники», т. III, изд. 1939 г., § 49):

$$\dot{U}'_1 = \dot{U}'_2 \cos \alpha l - j \dot{I}_2 Z_c \sin \alpha l,$$

$$\dot{I}'_1 = j \frac{\dot{U}'_2}{Z_c} \sin \alpha l + \dot{I}_2 \cos \alpha l,$$

где

$$\alpha = \omega \sqrt{L_0 C_0} = \frac{2\pi f}{c},$$

L_0 и C_0 — продольная индуктивность и поперечная емкость, отнесенные к единице длины (км), $c = 300\,000$ км/сек — скорость распространения электромагнитной энергии. При $f = 50$ Hz

$$\alpha = \frac{360^\circ}{2\pi} \cdot \frac{2\pi \cdot 50}{300\,000} = 0,06 \text{ град км},$$

Z_c — характеристическое сопротивление линии (сопротивление волны).

Если все величины пересчитать на высокое напряжение и через E' обозначить э. д. с. генератора, а через X — реактивное сопротивление генератора и реакции рассеяния повышающего трансформатора (реакция понижающего трансформатора может быть включена в нагрузку), то между E' , U_2 и I_2 получается следующее соотношение:

¹ E' определяется из соображения: $E' = U'_1 \frac{AW}{AW_0}$, где U'_1 — напряжение на зажимах генератора, AW и AW_0 — ампервитки, или токи возбуждения, при нагрузке и холостом ходе.

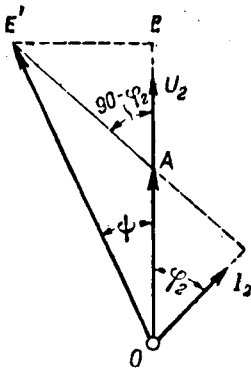


Рис. 2.

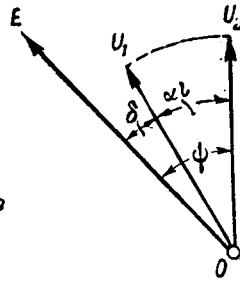


Рис. 3.

$$E = jX I_2 + U_1 = U_2 (\cos \alpha l - \frac{X}{Z_c} \sin \alpha l) + j I_2 (X \cos \alpha l + Z_c \sin \alpha l)$$

На рис. 2. изображена соответствующая векторная диаграмма:

$$\begin{aligned} \overline{OA} &= U_2 (\cos \alpha l - \frac{X}{Z_c} \sin \alpha l), \\ \overline{AE'} &= I_2 (X \cos \alpha l + Z_c \sin \alpha l). \end{aligned}$$

Передаваемая мощность определится следующим образом:

$$\begin{aligned} P &= P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 = \\ &= \frac{U_2 (X \cos \alpha l + Z_c \sin \alpha l) I_2 \sin (90 - \varphi_2)}{X \cos \alpha l + Z_c \sin \alpha l}, \\ P &= \frac{U_2 \overline{AE'} \sin (90 - \varphi_2)}{X \cos \alpha l + Z_c \sin \alpha l} = \frac{U_2 \overline{BE'}}{X \cos \alpha l + Z_c \sin \alpha l} = \\ &= \frac{E' U_2 \sin \psi}{X \cos \alpha l + Z_c \sin \alpha l}, \end{aligned}$$

ψ — угол сдвига между фазовой э. д. с. генератора E и фазовым напряжением на конце линии U_2 .

Если все отнести к междуфазовым э. д. с. E и напряжениям U и взять мощность всех трех фаз, то, так как $3 E' U_2 = \sqrt{3} E' \cdot \sqrt{3} U_2 = E U_2$, передаваемая мощность

$$P = \frac{E U_2 \sin \psi}{X \cos \alpha l + Z_c \sin \alpha l}$$

При заданных значениях E и U_2 предельная мощность, которая еще может быть передана данной длиной линией и которая определяет границу так называемой статической устойчивости, будет соответствовать наибольшему значению $\sin \psi$, т. е. $\psi = 90^\circ$. При дальнейшем увеличении нагрузки опережение э. д. с. генератора (увеличение угла ψ) уже не в состоянии дать большую мощность и U_2 все больше будет отставать от E , — питаемая система выпадет из синхронизма.

Работа на предельной мощности практически невозможна. Малейший скачок в сторону увеличения нагрузки вызывает выпадение всей системы

из такта. Передаваемая мощность должна поэтому быть меньше предельной. Передача энергии должна производиться с известным запасом (коэффициентом) статической устойчивости.

Кроме того, для удержания всей системы в синхронизме при авариях до момента вступления в действие защиты, при качаниях вследствие внезапных изменений режима работы и т. п., передача должна обладать еще так называемой динамической устойчивостью. Все это приводит к тому, что передаваемая мощность составляет лишь часть предельно возможной мощности:

$$\frac{P}{P_{max}} = \frac{1}{\eta} = \frac{\epsilon \ln \psi}{\sin 90^\circ} = \sin \psi,$$

где η — коэффициент статической устойчивости.

При отношении $\frac{P_{max}}{P} = 1,4$ угол ψ не должен превышать значения $\arcsin \frac{1}{1,4} = 45^\circ$.

Наиболее целесообразная передача энергии получается при передаче так называемой натуральной мощности, когда сопротивление нагрузки согласовано с характеристикой линии ($Z_c = Z_a$). При такой передаче отсутствуют излишние реактивные токи в линии; напряжения и токи в точках вдоль линий без потерь имеют одно и то же значение и сдвиг фаз между напряжениями в начале и конце линии равен αl , т. е. пропорционален длине линии.

При передаче натуральной мощности угол ψ может быть приравнен:

$$\psi = \delta + \alpha l,$$

где δ — угол сдвига в векторной диаграмме между E и U_1 (рис. 3).

Если исходить из значения $\psi = 45^\circ$ и принять, что угол $\delta = 15^\circ$, то предельная длина, на которую еще можно передать энергию трехфазным током обычным путем, определится из отношения:

$$\frac{45^\circ - 15^\circ}{0,06^\circ} = 500 \text{ km.}$$

Что касается величины передаваемой мощности, то она с увеличением расстояния уменьшается, так как обычно X в несколько раз меньше Z_c .

На рис. 4 представлена кривая $(X \cos \alpha l + Z_c \sin \alpha l)^{-1}$ в зависимости от l , из которой видно, что увеличение длины передачи с 200 до 500 km уменьшает по соображениям устойчивости

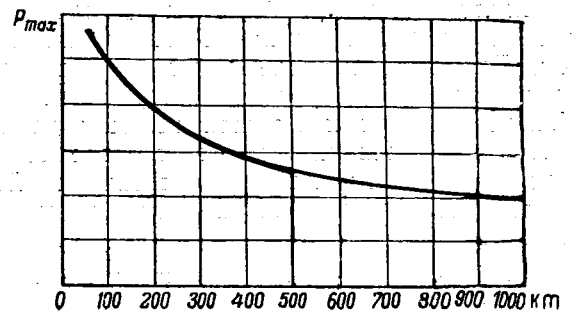


Рис. 4.

(помимо учета потерь и пр.) предельное значение мощности, которое можно передать по такой же линии и при том же напряжении примерно на $\frac{4,45 - 2,8}{2,8} \cdot 100 \approx 60\%$.

Дальность передачи энергии можно значительно увеличить применением искусственной компенсации или поперечной компенсации емкости линии путем включения индуктивностей между проводами, что снижает емкостную проводимость между проводами до $\omega C_0 - \frac{1}{\omega L}$ вместо ωC_0 ; или применением продольной компенсации индуктивности линии путем включения в расщелку линии емкостей, что снижает индуктивность линии до $\omega L_0 - \frac{1}{\omega C}$ вместо ωL_0 *.

При такой компенсации изменяется как коэффициент α' , так и Z_c . При поперечной компенсации

$$\alpha = \sqrt{\omega L_0 \left(\omega C_0 - \frac{1}{\omega L} \right)} = \omega \sqrt{L_0 C_0 \left(1 - \frac{1}{\omega^2 L C_0} \right)};$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{L_0}{C_0 \left(1 - \frac{1}{\omega^2 L C_0} \right)}}.$$

При продольной компенсации

$$\alpha = \sqrt{\left(\omega L_0 - \frac{1}{\omega C} \right) \omega C_0} = \omega \sqrt{L_0 C_0 \left(1 - \frac{1}{\omega^2 L_0 C} \right)};$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{L_0}{C_0 \left(1 - \frac{1}{\omega^2 L_0 C} \right)}}.$$

Можно было бы применить совместно и продольную, и поперечную компенсации, и тем самым снизить значение коэффициента X , снизив одновременно Z_c , что позволило бы увеличить дальность передачи, не повышая чрезмерно напряжение электропередачи.

Компенсация реактивных падений напряжений и токов в линии является весьма неудобной, так как она должна быть приспособлена к определенной мощности.

Вместо индуктивных катушек можно применять синхронные машины, включаемые или параллельно к линии (с недовозбуждением) или в расщелку (с перевозбуждением), напряжение и ток которых приравливались бы к нагрузке, которую при данном режиме передает линия. Возможно было бы применить для целей компенсации также и асинхронные машины. Применение компенсации, однако, весьма удорожает установку и осложняет эксплуатацию.

Самой длинной и мощной из всех до сего времени осуществленных электропередач является передача от гидроэлектростанции Boulder-dam в Лос-Анжелос (США) по двухцепной

линии длиной в 450 km, передающей 300 000 kVA при напряжении в 287 kV.

Стоимость передачи столь больших мощностей на такие расстояния настолько возрастает, что техника ищет новых решений этой задачи.

Такое решение дает применение для целей передачи энергии постоянного тока высокого напряжения.

Применение постоянного тока высокого напряжения в энергосистемах ограничивается исключительно процессом передачи энергии. Производство электрической энергии — преобразование механической энергии в электрическую — и впредь будет производиться на трехфазном токе, так как получение постоянного тока высокого напряжения больших мощностей возможно лишь путем последовательно-параллельного соединения большого числа машин, что явно не может идти в сравнение мощными электрическими машинами трехфазного тока, дающими до 100 000 kW и выше в одной единице. Повышение напряжения при переменном токе осуществляется необычайно просто трансформаторами, работающими с высоким к. п. д. (до 99,4%) и не требующими ухода.

Равным образом распределение энергии и подведение ее потребителям и впредь будет производиться на переменном (трехфазном) токе ввиду возможности понижать напряжение при помощи трансформаторов и существования таких простых, надежных и дешевых двигателей, какими являются асинхронные двигатели.

Затруднения, которые долгое время стояли на пути применения постоянного тока для целей передачи больших мощностей, заключались в отсутствии надежных, дешевых и экономичных преобразователей тока. Успехи, достигнутые за последние годы в деле построения ртутных преобразователей на высокие напряжения и большие токи, открывают широкие перспективы в деле применения постоянного тока для передачи энергии на сверхдальние расстояния. В настоящее время уже строятся ртутные преобразователи — одноанодные на 50 kV и 150 A и с параллельными анодами на 33 kV и 400 A, что при последовательном соединении (см. ниже) дает уже возможность осуществлять передачи на сотни тысяч киловатт.

Имеется существенная разница в работе ртутных преобразователей в качестве выпрямителей, преобразующих переменный ток, вырабатываемый на станциях, в постоянный, и в работе их на другом конце передачи в качестве инверторов, превращающих постоянный ток в переменный (трехфазный).

В выпрямителе, например трехфазном, ток автоматически переходит с одной фазы на следующую в моменты, когда э. д. с. в последующей фазе становится больше, чем э. д. с. в предыдущей фазе.

Если бы не было индуктивности рассеяния в трансформаторе, ток сразу переходил бы с одной фазы на другую как раз в моменты равенства э. д. с. двух смежных фаз (рис. 5), так как при односторонней проводимости в ртутном вы-

* L_0 и C_0 — индуктивность и емкость единицы длины линии; L и C — индуктивность и емкость включенных индуктивных катушек и конденсаторов, отнесенные также к единице длины.

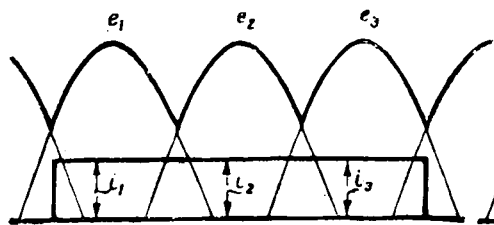


Рис. 5.

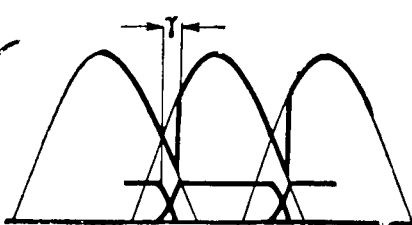


Рис. 6.

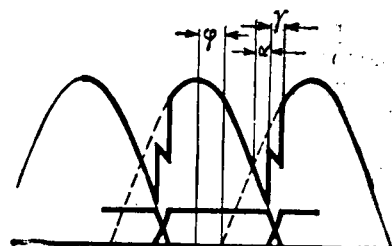


Рис. 7.

прямителе и при отсутствии или весьма малом сопротивлении обмоток трансформатора ток будет проходить через ту фазу, в которой действующая э. д. с. больше. Вследствие наличия индуктивности рассеяния в обмотках трансформатора переход тока с одной фазы в другую задерживается и необходимо некоторое время, в течение которого ток в предыдущей фазе спадает до нуля и нарастает в последующей фазе. Время перехода с одной фазы на другую определяется так называемым углом перекрытия γ (рис. 6). В интервале γ две смежные фазы трансформатора как бы коротко замыкаются, вследствие чего между средними линиями кривых напряжения и тока получается сдвиг фаз и в выпрямленном напряжении в момент окончательного перехода тока в следующую фазу наблюдается скачок.

Чтобы избавить выпрямленный ток от высоких гармоник, накладывающихся на его среднее значение, в цепь выпрямленного тока включается большая индуктивность, так что ток, когда горит дуга в одной лишь фазе, имеет неизменное значение.

Дуга в одной фазе горит меньше полупериода, и ток, поступающий в трансформатор из генератора, отличается от синусоиды и имеет искаженный вид.

Применение так называемых управляющих сеток, устанавливаемых перед анодами ртутного выпрямителя, позволяет задерживать переход дуги с одной фазы на другую: сообщая сетке отрицательный потенциал по отношению к аноду и тормозя тем самым электроны, испускаемые катодным пятном на ртути, можно воспрепятствовать возникновению дуги между соответствующим анодом и катодом после того, как ток прошел через свое нулевое значение².

Сообщая сеткам периодически, в синхронном темпе, положительные потенциалы по отношению к катоду, можно сдвигать во времени переход дуги с одной фазы на другую. В результате этого среднее значение выпрямленного напряжения снижается и можно получить увеличение сдвига фаз между кривыми напряжения и тока на стороне переменного тока (рис. 7). Сообщая всем сеткам сразу отрицательный потенциал, можно в течение одного периода прервать ток в ртутном выпрямителе и тем самым как бы выключить цепь постоянного тока.

² Прервать ток, проходящий в ртутных парах, нельзя, так как сетка при этом облегается положительными ионами, компенсирующими действие отрицательных зарядов сетки.

Обычно выпрямители работают без управления, сетки в них служат лишь для защиты. Но вследствие перекрытия анодов коэффициент мощности на стороне переменного тока даже при работе без управления все же меньше единицы ($\cos \varphi = 0,95 \text{--} 0,98$).

В качестве инверторов ртутные преобразователи без управляющих сеток не могут работать. Дело в том, что выпрямленный ток, проходя на инверторной стороне последовательно через обмотки трансформатора и ртутный преобразователь, стремится пройти через ту фазу, в которой в данный момент противодействующая э. д. с. — наименьшая. Поэтому для перехода тока из одной фазы в следующую необходимо открыть следующий анод, т. е. сообщить его сетке положительный потенциал до того, как э. д. с. следующей фазы сравняется с э. д. с. фазы, работающей в данный момент. Вследствие этого аноды необходимо открывать всегда с опережением. Это опережение должно иметь некоторый запас, чтобы при увеличении нагрузки и связанной с этим затяжки перекрытия двух смежных анодов ток успел перейти на следующую фазу до того момента, когда сравнятся противодействующая э. д. с. работающей в данный момент фазы и э. д. с. следующей (рис. 8).

В результате этого посылаемый трансформатором в питаемую сеть ток опережает напряжение сети: инвертор кроме активной слагающей тока посылает в сеть еще опережающую реактивную слагающую.

Для создания в трансформаторе э. д. с., противодействующей поступающему в него прямому току, питаемая система должна иметь частотную синхронную машину, определяющую частоту преобразованного тока и, кроме того, покрывающую реактивную мощность как потребителя системы, так и реактивную мощность инвертора. В этом заключается слабая сторона инвертирования.

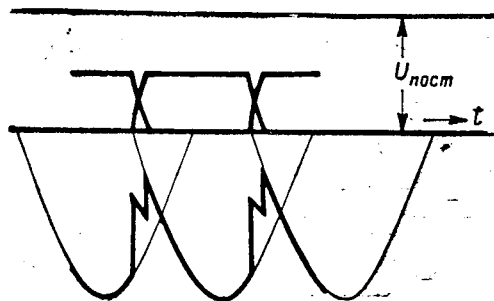


Рис. 8.

При выпрямлении и инвертировании возникают высшие гармоники напряжений и токов. В цепи постоянного тока они сглаживаются, как указывалось выше, включением в линию реакторов с большой индуктивностью у обоих концов линии. Высшие гармоники сказываются, главным образом, в цепях трехфазного тока генераторов и трансформаторов со стороны выпрямителей и в трехфазной сети питаемой системы.

Кроме того, ток в обмотках трансформатора, непосредственно примыкающих к ртутным выпрямителям, протекает не в течение полного периода, а лишь в некоторой его части. Поэтому установленная мощность трансформаторов должна быть выбрана больше мощности выпрямленного тока. Для получения лучшей кривой выпрямленного напряжения, снижения высших гармоник токов в генераторах, трансформаторах и в питаемой сети и приближения их к синусоидальной форме прибегают к многофазным схемам выпрямления и инвертирования. Так, на рис. 9 показана шестифазная, а на рис. 10 двенадцатифазная схема. Соединяя первичную обмотку в треугольник или помещая на трансформаторах вспомогательные трехфазные обмотки, соединяемые накоротко в треугольник, можно компенсировать третью гармонику и все кратные ей. Останутся при шестифазной схеме гармоники пятого и седьмого, а при двенадцатифаз-

ной схеме гармоники одиннадцатого и тринадцатого порядка. Последние уже мало влияют на снижение полезной мощности генераторов и трансформаторов.

При выборе схем соединения трансформаторов и преобразователей весьма существенную роль помимо величины потребной установленной мощности и значений высших гармоник играют максимальные обратные напряжения в ртутном выпрямителе между анодом и катодом в течение той части периода, когда данный анод не пропускает тока. Другим важным параметром является предельное значение проходящего через преобразователь тока.

При трехфазном преобразовании обратное напряжение составляет 173% от амплитудного значения напряжения переменного тока, при двенадцатифазном — 200%.

Весьма полезной в отношении снижения обратных напряжений является схема Греца, изображенная на рис. 11. В этой схеме выпрямленное напряжение составляется из мгновенных значений э. д. с. двух фаз трехфазного трансформатора и выпрямленный ток также проходит всегда последовательно через две фазы. Схема эквивалентна шестифазной схеме преобразования.

Для ограничения токов при коротких замыканиях первая опытная линия передачи энергии на постоянном токе высокого напряжения была осуществлена Уиллисом, Бедфордом и Эльдером не при неизменном напряжении, а при неизменном токе. В этой опытной линии на выпрямительной стороне трехфазный ток неизменного напряжения путем применения известной схемы Бушера, состоящей из комбинации индуктивностей и емкостей, настроенных в резонанс, превращался в трехфазный ток неизменного значения тока. Трехфазный ток неизменного значения выпрямители преобразовывали в постоянный ток неизменного значения. Пройдя линию передачи, на другом конце ее ток в инверторах превращался в трехфазный ток неизменного значения, который затем в обратной схеме Бушера преобразовывался в трехфазный ток неизменного напряжения. При этом способе передачи постоянным током неизменной силы напряжение постоянного тока изменяется пропорционально нагрузке. Эта опытная линия была сдана в эксплуатацию в 1936 г. Передача работала

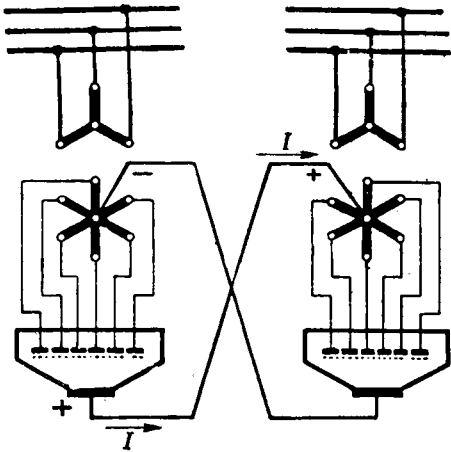


Рис. 9.

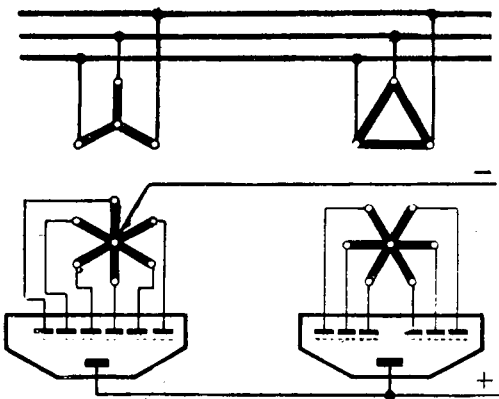


Рис. 10.

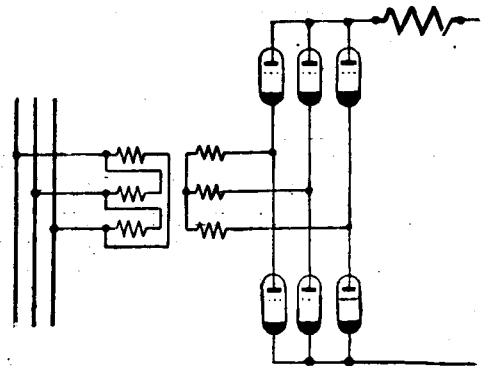


Рис. 11.

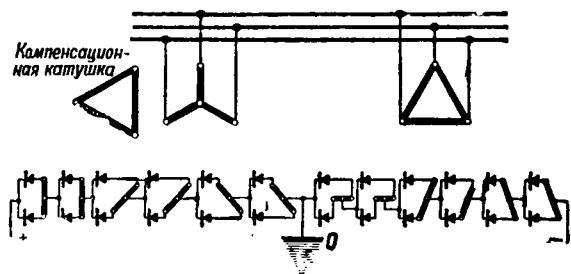


Рис. 12.

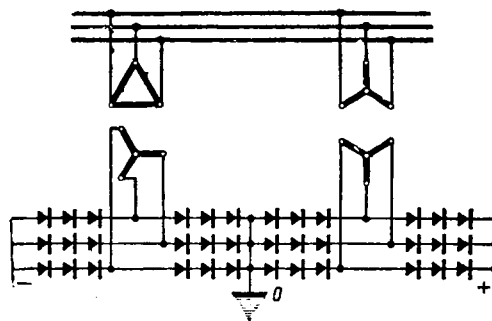


Рис. 13.

на газотронах на одном и тиратронах на другом конце и передавала 5 000 кВт при 30 кВ.

Однако такая схема передачи не оправдала себя. Общая мощность реакторов на обоих концах была того же порядка, что и передаваемая мощность, кажущаяся мощность конденсаторов, превышала полезную мощность в три раза. Но помимо этого недостатки такой схемы передачи заключаются в том, что, во-первых, передача работает с потерями, не зависящими от нагрузки, во-вторых, разрыв цепи постоянного тока приводит к необычайно большим перенапряжениям.

Для получения больших мощностей постоянного тока высокого напряжения по-разному комбинируют отдельные ртутные преобразователи.

Так, в проекте фирмы ВВС (Швейцария) в основу положена схема, предложенная в свое время у нас Г. И. Бабатом. По этой схеме применяются однофазные трансформаторы, имеющие парные вторичные обмотки (одну или две пары). Обмотки каждой пары соединяются последовательно, и крайние концы одной пары присоединяются к анодам своего ртутника. Путем последовательного соединения 6 ртутных выпрямителей (с параллельными анодами) по 33 кВ и 400 А каждый удается получить $6 \times 33 \times 400 \cong 80$ тыс. кВт.

Для повышения напряжения передаваемой мощности без увеличения напряжения по отношению к земле можно две таких комбинации соединить последовательно, заземлив среднюю точку. Тогда мощность постоянного тока будет 160 тыс. кВт при 400 кВ между проводами. Если первичные обмотки на одной половине соединить в треугольник, а на другой — в звезду, снабдив эти трансформаторы специальной обмоткой для демпфирования гармоник, кратных трем (рис. 12), то кривая выпрямленного напряжения в отношении высших гармоник будет эквивалентна кривой при двенадцатифазном преобразовании.

Другая схема по Грецу, которая была применена на одной опытной линии за границей, состояла из 6 групп (по 3 последовательно в каждой группе) одноанодных преобразователей по 35—50 кВ и 50 А, которые в общей сложности давали $200 \times 150 = 30$ тыс. кВт, а двойная такая система — 60 тыс. кВт при 400 кВ. Для правильного распределения напряжения между ртутными выпрямителями одной группы в отрезки периода негорения анодов параллельно к ртутным выпрямителям присоединялись конденсаторы с последовательными сопротивлениями.

В линиях электропередач автоматические выключатели ставятся лишь на стороне трехфазного тока: перед трансформатором на выпрямительном и после трансформатора на инверторном конце. В цепи же постоянного тока ограничиваются сеточной защитой, которая сообщает сеткам отрицательные потенциалы и тем самым необычайно быстро (менее чем в один период) прекращает прохождение тока через ртутные выпрямители. Последовательное соединение выпрямителей (рис. 13) обладает еще тем преимуществом, что обратные зажигания в одном агрегате не сказываются на работе других и лишь немного снижают напряжение и ток, пока защита не ликвидирует обратное зажигание. Таким образом большая часть случайных обратных зажиганий остается для потребителей незамеченной.

Переходя к самой линии электропередачи постоянным током высокого напряжения, следует сказать, что она по своему устройству и по своей работе значительно проще, чем линия электропередачи трехфазным током, а именно:

1. Для каждой цепи требуется лишь два, а не три провода, как при трехфазном токе.
2. Изоляция при постоянном токе должна быть рассчитана лишь на рабочее напряжение, в то время как при переменном токе максимальное напряжение равно рабочему эффективному значению, умноженному на $\sqrt{2}$.
3. Ввиду вышеуказанной можно при постоянном токе по соображениям короны взять провод меньшего радиуса.
4. При постоянном токе не происходит обмена энергии между электростатическим и магнитным полем в линии, отсутствуют реактивные слагающие тока и индуктивные падения напряжения. Вследствие отсутствия при постоянном токе скин-эффекта ток распределяется равномерно по всему сечению провода. Это позволяет выбирать при постоянном токе провода меньшего сечения и притом не полые, а сплошные, что уменьшает вес возможного гололеда.

5. Падения напряжения и потери в линии определяются лишь активной слагающей тока.

6. Сеточное управление и быстродействующая, почти безынерционная, защита (в 0,015 сек.) позволяют не ставить дорогостоящих и весьма громоздких выключателей на стороне высокого напряжения трансформаторов и обходиться лишь выключателями на стороне более

низкого напряжения. Короткие замыкания на линии постоянного тока не подпитываются со стороны питаемой системы и, наоборот, токи короткого замыкания в питаемой системе не могут возрастать за счет линии передачи постоянного тока, так как предельное значение тока, даваемое инвертором, можно ограничить посредством того же сеточного управления.

7. Частоты переменного тока на выпрямительном и инверторном концах совершенно не связаны друг с другом. Это позволяет связывать интерконнекционными линиями для взаимной поддержки удаленные энергосистемы, не прибегая к их синхронизации. Это также дает гидростанциям возможность (при нормальной частоте в питаемой системе) работать при более низкой частоте в случае, например, понижения уровня воды в верхнем бьефе.

8. При одной и той же величине передаваемой мощности и при одном и том же максимальном значении напряжения по отношению к земле (в случае заземленной средней точки) сравнение потерь при одном и том же сечении одного провода приводит к следующему результату:

$$U_{\text{носм}} = 2\sqrt{2} U_{\phi}$$

$$P = U_{\text{носм}} I_{\text{носм}} = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi,$$

$$\left[3 \left(\frac{P}{2U_{\phi}} \cos \varphi \right)^2 \frac{l}{\gamma s} \right] : \left[2 \left(\frac{P}{2\sqrt{2}U_{\phi}} \right)^2 \frac{l}{\gamma s} \right] = \frac{4}{3 \cos^2 \varphi},$$

иначе говоря, потери при трехфазном токе $\frac{4}{3 \cos^2 \varphi}$ больше, чем при постоянном токе.

Если исходить из одинаковой затраты проводникового материала, то при прочих равных условиях расстояния, на которое можно передавать энергию при постоянном токе, будут по крайней мере в два раза больше, чем при трехфазном ($3l_2s_2 = 2l_1s_1 = v$):

$$3 \left(\frac{P}{3U_{\phi} \cos \varphi} \right)^2 \frac{l_2}{\gamma 3l_2} = 2 \left(\frac{P}{2\sqrt{2}U_{\phi}} \right)^2 \frac{l_1}{\gamma 2l_1},$$

откуда

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{2}{\cos \varphi}.$$

Если еще учесть, что вследствие меньшего числа проводов и меньшего числа гирлянд мачты могут иметь меньшую высоту и меньшую ширину, то станет ясным, какие большие преимущества имеет передача энергии на постоянном токе по сравнению с трехфазным током, не говоря уже о том, что вследствие полной устойчивости работы передачи постоянным током расстояния передачи энергии постоянным током ограничиваются лишь потерями в линии.

Здесь уместно отметить, что в плане развития электроснабжения США, составленном еще до войны Россом (советником Рузвельта по вопросам энергетики), предусмотрены передачи

энергии постоянным током с напряжением $2 \times 400 \text{ kV} = 800 \text{ kV}$ для питания восточных штатов от гидроэлектростанций Запада. Крупнейшей из намеченных является магистраль от гидроэлектростанций Bonnaville Grand Coulee на реке Колумбия в районе Чикаго, длиной в 3 000 км, передающая 750 000 kW по двум сплошным медным проводам сечением по 1256 mm² на деревянных двухпроводных опорах при потере энергии в 10%.

Выше мы рассматривали передачу энергии по воздушным линиям. Кабели для передачи энергии переменным (трехфазным) током на большие расстояния при высоком напряжении не приспособлены, так как уже для 100 kV они должны выполняться наполненными маслом под давлением с очень большим числом стопорных муфт, особенно при прокладке их по пересеченной местности. Для постоянного тока уже изготавливаются одножильные алюминиевые кабели весьма простой конструкции с бумажной изоляцией и вязкой пропиткой на напряжение в 200 kV и сечением в 150 mm². Изготовление кабелей большего сечения на большие напряжения не представляет затруднений. Кабели постоянного тока в известной установке Тюри, уложенные 40 лет назад, не имели за все это время ни одной аварии, и сопротивление изоляции их постепенно повышалось.

Передача кабельными линиями имеет огромные преимущества, делая передачу энергии во много раз надежнее и снижая весьма значительно эксплуатационные расходы.

В связи с вопросом о резерве в передаче энергии можно заметить следующее. При передаче энергии трехфазным током требуется вторая цепь, так как, например, при обрыве одного провода дальнейшая передача делается невозможной, в то время как при постоянном токе обрыв одного провода или выход из строя одного кабеля позволяет, если использовать в качестве обратного провода землю, передавать половинную мощность.

Как показали опыты, проведенные Тюри в его передачах постоянным током при напряжении, доходящем до 125 kV, применение земли в качестве обратного провода не оказывало никаких помех другим устройствам. Во избежание явлений коррозии в подземных сооружениях можно при постоянном токе заземление средней точки вынести достаточно далеко за пределы подземных сооружений, проложив кабель от подстанций до места заземления.

Передача энергии постоянным током имеет и свои недостатки:

1. Необходимость дополнительных крупных и сложных подстанций — выпрямительной на одном и инверторной на другом конце.

2. Преобразование постоянного тока в переменный не связано с подачей в сеть реактивной (отстающей) мощности, наоборот, ее должна давать питаемая сеть. Вследствие этого, а также для поддержания надлежащей частоты и напряжения, в питаемой сети должны работать довольно мощные синхронные машины, покрываю-

щие реактивную мощность как потребителей, как и инверторов.

3. Невозможность в настоящее время при работе с неизменным напряжением иметь стветвления от линий передач постоянного тока. Линии постоянного тока могут передавать энергию в обоих направлениях лишь между двумя концевыми преобразовательными подстанциями без ответвлений.

4. Наличие высших гармоник и сравнительно низкий коэффициент мощности при инвертировании увеличивают, хотя и немного, потери в генераторах и трансформаторах. Увеличение потерь в генераторах может быть скомпенсировано допущением больших реактивных сопротивлений, в то время как генераторы, работающие на длинные линии передачи трехфазным током, должны иметь пониженное реактивное сопротивление. Высшие гармоники, кроме того, оказывают мешающее влияние на линии связи, вследствие чего последние должны быть удалены от воздушных линий электропередач или каблированы.

Но все же все эти минусы перекрываются теми выгодами, которые дает постоянный ток, особенно при передаче больших мощностей на такие расстояния, как 500 км и выше.

К сожалению, трудно в настоящее время провести сравнительные подсчеты стоимости передачи энергии постоянным и трехфазным током вследствие отсутствия данных о стоимости преобразователей.

Сравнительные подсчеты, проведенные Эреншпергером в Швейцарии, показали, что передача 400 тыс. кВт на 500 км с напряжением в 400 кV требует при трехфазном токе на 50% больше первоначальных затрат, чем при посто-

янном (80 млн. франков при постоянном токе против 122 млн. франков при трехфазном токе) и примерно такое же увеличение эксплуатационных расходов (4,5 сант. за киловаттчас при трехфазном токе против 3 сант. за киловаттчас при токе постоянном; число часов использования было принято равным 8 000 в год).

Сравнительные подсчеты, сделанные в свое время у нас «Гидроэнергопроектом» при проектировании линии передачи с Куйбышевской гЭС в Центрально-промышленный район мощностью 1 000 000 кВт на расстояние 900 км при напряжении в 380 кV, показали, что при применении постоянного тока стоимость сооружения электропередачи (включая и преобразовательные подстанции) будет примерно в два раза ниже, чем при трехфазном, при сокращении расхода алюминия до 33%; стоимость передачи одного киловаттчаса снижается до 2,1 коп. при постоянном против 3,8 коп. при трехфазном токе.

Если даже отбросить все финансово-экономические выгоды применения постоянного тока для передачи электроэнергии, которые очевидны, то все же одна техническая возможность передавать огромные мощности на расстояния, измеряемые тысячами и больше километров, что недоступно при применении трехфазного тока, должна побудить наших энергетиков и электротехников вплотную заняться проблемой передачи энергии постоянным током высокого напряжения, особенно конструированием высоковольтных и мощных преобразователей. Это необходимо для того, чтобы при дальнейшем развитии электрификации СССР могли бы быть использованы удаленные водные источники энергии и в следующей пятилетке постоянный ток нашел бы себе широкое применение.



Вещества с высокой и сверхвысокой диэлектрической проницаемостью

Член-корреспондент Академии наук СССР Б. М. ВУЛ

Физический институт им. Лебедева Академии наук СССР

Любая электрическая установка содержит два вида материалов: проводники электричества и изоляторы или диэлектрики. Под воздействием электрического напряжения носители электрических зарядов — электроны и ионы — двигаются сквозь проводник, осуществляя в нем сквозной ток проводимости. В диэлектриках по сравнению с проводником сквозной ток проводимости ничтожно мал. Смещение электронов и ионов ограничено внутри диэлектриков пределами атома, молекулы, элементарной ячейки кристаллической решетки. Под действием электрического поля диэлектрик поляризуется: в каждой частице диэлектрика происходят смещения положительных и отрицательных электрических зарядов в противоположные стороны от их положения равновесия.

Величина поляризации зависит от строения вещества и от напряженности электрического поля, воздействующего на вещество. Мерой поляризации вещества служит его диэлектрическая проницаемость — ϵ , связанная с поляризацией и напряженностью поля следующим соотношением:

$$\epsilon = 1 + 4\pi \frac{P}{E},$$

где P — поляризация, или электрический момент в единице объема; E — напряженность электрического поля.

Так как поляризация вызывается смещением электрических зарядов, из которых построено вещество, то исследование диэлектрической проницаемости является одним из методов изучения структуры вещества. Исследованием диэлектрической проницаемости занимались почти все крупные физики XIX столетия, начиная с Фарадея — основоположника этой отрасли физики. Однако, по мере развития других более совершенных методов исследования, изучение диэлектрической проницаемости утрачивает свое значение как методика исследования строения вещества. Но в то же время все возрастающее применение электроизолирующих материалов в электротехнике вновь привлекает внимание ис-

Исследована диэлектрическая проницаемость титанатов металлов второй группы таблицы Менделеева. Установлено, что титанат бария является новым типом сегнетоэлектрика, который может быть использован, как электроизоляционный материал с диэлектрической проницаемостью, превышающей 1 000. Статья является изложением доклада автора на Общем собрании АН СССР в январе 1946 г.

следователей к изучению диэлектрической проницаемости как свойства материалов, управление которым необходимо для практических целей.

1. Разработка материалов для высокочастотных конденсаторов.

В последние годы радиотехника в целях дальнейшего прогресса предъявила требования на материалы, обладающие большими значениями диэлектрической проницаемости, а также на материалы, диэлектрическая проницаемость которых определенным образом изменяется при изменениях температуры. Изыскание методов получения таких материалов было предпринято нами совместно с Г. И. Сканами и группой академика И. В. Гребенщикова (В. П. Барзаковский и Дуброво) во время войны.

Нами были использованы результаты выполненного академиком А. Ф. Иоффе и мной в 1930 г. исследования составов, содержащих рутит — одну из модификаций двуокиси титана [Л. 1]. В поликристаллическом виде рутит обладает диэлектрической проницаемостью, равной 120, в то время как у обычных электроизолирующих материалов диэлектрическая проницаемость равна нескольким единицам. Тогда еще нами было показано, что для диэлектрической проницаемости механической смеси, содержащей рутит, оправдывается так называемое соотношение Лихтенкера:

$$\lg \epsilon = \tau_1 \lg \epsilon_1 + (1 - \tau_1) \lg \epsilon_2 \quad (1)$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость смеси; ϵ_1 и ϵ_2 — величины диэлектрической проницаемости компонент смеси,

τ_1 — доля первой компоненты в смеси.

Применение чистого рутита вследствие высокой температуры его спекания и других особенностей оказалось невозможным, и для решения поставленной нами задачи мы обратились к соединениям рутита и в первую очередь к *титанату магния*, использование которого для аналогичной цели было известно. Исследование полученного нами титаната магния показало, что диэлектрическая проницаемость его составляет около 15 и что она возрастает с увеличением

температуры. Нетрудно видеть, что из соотношения (1) следует, что температурный коэффициент диэлектрической проницаемости

$$\frac{1}{\epsilon} \frac{d\epsilon}{dt} = \tau_1 \frac{1}{\epsilon_1} \frac{d\epsilon_1}{dt} + (1 - \tau_1) \frac{1}{\epsilon_2} \frac{d\epsilon_2}{dt},$$

т. е. для определения температурного коэффициента диэлектрической проницаемости смеси можно пользоваться обычным законом Ньютона для определения свойств смеси. Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости смеси равен взвешенной средней арифметической величине температурных коэффициентов диэлектрической проницаемости компонент. Задача изыскания материала с заданным температурным коэффициентом диэлектрической проницаемости была, таким образом, сведена к изысканию двух материалов, из которых один обладал бы положительной, а другой отрицательной величиной температурного коэффициента. В качестве одного из таких материалов мог быть использован титанат магния. Дальнейшие изыскания показали, что в качестве второго материала могло быть применено соединение двуокиси титана с доломитом $MgCa(CO_3)_2$. Как показали предварительные измерения, диэлектрическая проницаемость этого материала составляла около 70 и заметно снижалась с увеличением температуры. В результате этих предварительных исследований мы получили два материала, из которых один обладал положительным, а другой отрицательным температурным коэффициентом и смешение которых позволяло нам получать материал с заданной наперед величиной температурного коэффициента от $-10 \cdot 10^{-4}$ до $+1,5 \cdot 10^{-4}$.

Данные измерений приведены на рис. 1 и 2. Продолжение этих работ Г. И. Сканиви непосредственно на одном из заводов НКЭП привело к разработке технологии получения в заводских условиях двух необходимых типов материалов, удовлетворяющих основным поставленным радиотехникой требованиям [Л. 2]. Для производства этих материалов и для изготовления из них высокочастотных керамических конденсаторов на одном заводе НКЭП был организован

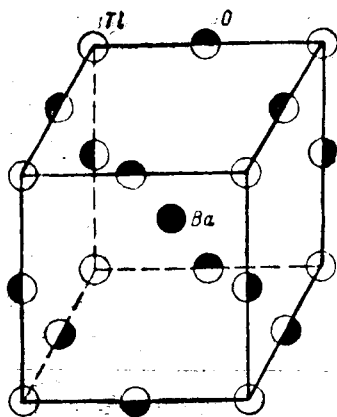


Рис. 3. Кристаллическая решетка типа перовскит.

специальный цех под руководством директора завода И. М. Калашникова. Завод выпустил во время войны несколько сот тысяч конденсаторов, переданных радио заводам и использованных для изготовления радиоаппаратуры.

II. Диэлектрическая проницаемость титанатов металлов второй группы таблицы Менделеева. В начале этой работы, целевое назначение которой заключалось в решении практической задачи, нами было установлено резкое различие в диэлектрических свойствах двух непосредственно близких по своему составу веществ: титаната магния и титаната кальция. Это послужило исходной предпосылкой для общего исследования титанатов металлов второй группы таблицы Менделеева. Целевое назначение этой работы, выполненной совместно с И. М. Гольдман, заключалось в установлении связи между диэлектрическими свойствами вещества и его составом. Как показали измерения, диэлектрическая проницаемость титаната магния равна 17, а титаната кальция 115. Такая большая разница в величине диэлектрической проницаемости может быть вызвана двумя обстоятельствами: во-первых, тем, что ион кальция сам по себе легче поляризуется, чем ион магния; электронная поляризуемость иона кальция равна $0,47 \cdot 10^{-24} \text{ см}^3$, а иона магния только $0,10 \cdot 10^{-24} \text{ см}^3$; во-вторых, тем, что оба титаната отличаются друг от друга по типу кристаллической решетки — титанат кальция образует решетку типа перовскит, титанат магния — типа ильменит. Схема кристаллической решетки типа перовскит титаната бария приведена на рис. 3.

Для того чтобы оценить, какой из двух факторов имеет преобладающее значение, нами был получен титанат кадмия, образующий решетку типа ильменит, т. е. той же формы, что и титанат магния. Однако электронная поляризуемость у иона кадмия в два с лишним раза больше, чем у иона кальция. Оказалось, что диэлектрическая проницаемость титаната кадмия равна 62. Несмотря на то, что электронная поляризуемость у иона кадмия в два с лишним раза больше, чем у иона кальция, диэлектрическая проницаемость титаната кадмия почти в два раза меньше, чем у титаната кальция.

Таким образом было установлено, что преобладающее значение имеет тип кристаллической решетки и что решетка типа перовскит благоприятствует получению больших величин диэлектрической проницаемости. С увеличением радиуса иона щелочно-земельного металла в решетках типа перовскит должно несколько увеличиться расстояние между ионами, что приводит

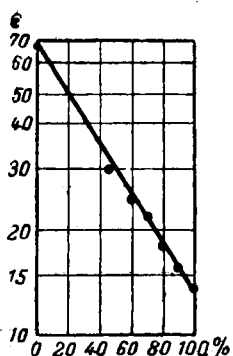


Рис. 1. Диэлектрическая проницаемость состава из титанатов в зависимости от концентрации титаната магния.

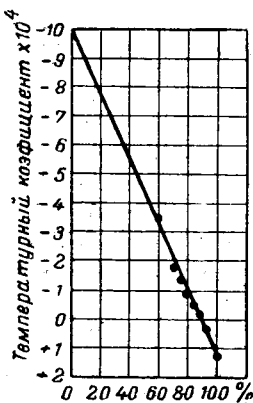


Рис. 2. Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости состава из титанатов в зависимости от концентрации титаната магния.

к уменьшению жесткости связи между ними или к большей податливости в электрическом поле, т. е. к большей поляризуемости и возрастанию диэлектрической проницаемости. Измерения показали, что у титаната стронция диэлектрическая проницаемость равна около 150, а у титаната бария превышает 1 000.

Данные о величине диэлектрической проницаемости металлов второй группы приведены в табл. 1.

Таблица 1

Диэлектрическая проницаемость титанатов металлов второй группы таблицы Менделеева

Подгруппа	Металл, образующий титанат	Тип кристаллической решетки	Диэлектрическая проницаемость ϵ
I	Бериллий	—	70
	Кальций	Перовскит	115
	Стронций	„	155
	Барий	„	>1 000
II	Магний	Ильменит	17
	Цинк	—	30
	Кадмий	Ильменит	62

Из данных, приведенных в табл. 1, видно, что, начиная с кальция, металлы второй группы, атомы которых после отдачи двухвалентных электронов подобны инертным газам, образуют титанаты типа перовскит и обладают большой диэлектрической проницаемостью. Металлы побочной подгруппы образуют титанаты с кристаллической решеткой иного типа и обладают средней величиной диэлектрической проницаемости, также возрастающей по мере увеличения атомного номера металла. Среди перовскитов особо выделяется титанат бария, обладающий диэлектрической проницаемостью, превышающей 1 000.

Эту особенность титаната бария можно сопоставить с тем, что он среди исследованных соединений, как видно из данных табл. 2, является единственным, у которого расстояние между ионами титан — кислород больше, чем сумма их радиусов.

Таблица 2

Наименование титаната	Величина ребра (элемент куба), Å	Расстояние между ионами кислород — титан, Å	Сумма радиусов ионов кислорода и титана Å
Титанат кальция	3,80	1,90	1,96
Титанат стронция	3,89	1,95	1,96
Титанат бария	3,97	1,99	1,96

Радиусы ионов взяты по Гольдшмидту. Рыхлость кристаллической решетки титаната бария является причиной его большой диэлектрической проницаемости.

В результате этого исследования, выполненного с целью установления связи между составом вещества и его диэлектрическими свойствами, впервые было указано на способ получения пригодного для электроизоляционных целей материала, обладающего диэлектрической проницаемостью в 10 раз большей, чем у материалов с

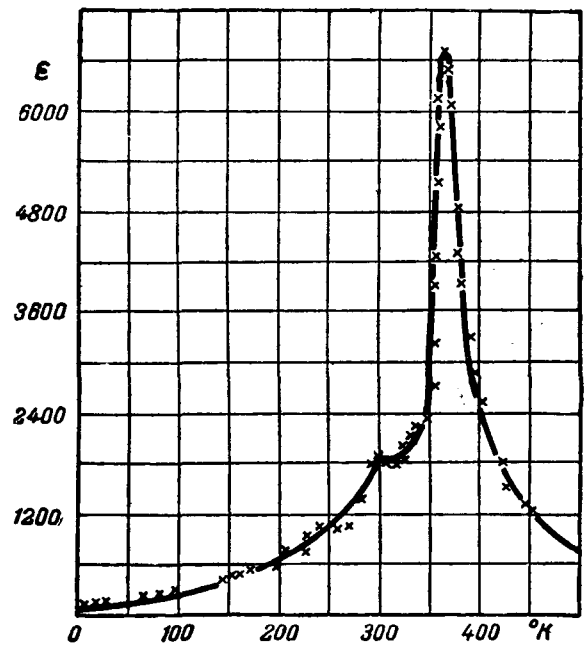


Рис. 4. Диэлектрическая проницаемость титаната бария в зависимости от температуры.

наибольшей проницаемостью, практически использованных ранее в качестве электроизолирующих материалов. Установление сверхвысокой диэлектрической проницаемости у титаната бария побудило нас сосредоточить дальнейшую работу на исследовании его как вещества, обладающего особыми диэлектрическими свойствами.

III. Диэлектрическая проницаемость титаната бария. Величина диэлектрической проницаемости титаната бария была измерена при разных температурах от $+200^\circ\text{C}$ до температуры, близкой к абсолютному нулю, превышающей его менее чем на два градуса. Измерения при низких температурах в жидком кислороде, азоте, водороде и гелии были произведены в Институте физических проблем с помощью А. И. Шальникова и В. П. Пешкова. Результаты измерений приведены на рис. 4. При температуре жидкого гелия около 2°K диэлектрическая проницаемость титаната бария $\epsilon = 100$, в твердом водороде ($T = 14^\circ\text{K}$) $\epsilon = 114$, в твердом азоте ($T = 60^\circ\text{K}$) $\epsilon = 165$, в жидком кислороде ($T = 90,9^\circ\text{K}$) $\epsilon = 250$, при комнатной температуре $\epsilon \approx 1 400$ и относительно мало изменяется до $+40^\circ\text{C}$. При нагреве на несколько десятков градусов от $+40^\circ\text{C}$ до $+80^\circ\text{C}$ диэлектрическая проницаемость титаната бария увеличивается почти в 4 раза, достигает максимума и резко уменьшается при дальнейшем увеличении температуры.

Наряду с этой особенностью в температурном ходе диэлектрической проницаемости следует отметить также особенность в области температур, близких к абсолютному нулю. Некоторые характеристики вещества, связанные с тепловым движением, как, например, теплоемкость, энтропия, тепловой коэффициент расширения при приближении температуры вещества к абсолютному нулю, также стремятся к нулю. Аналогичным должно

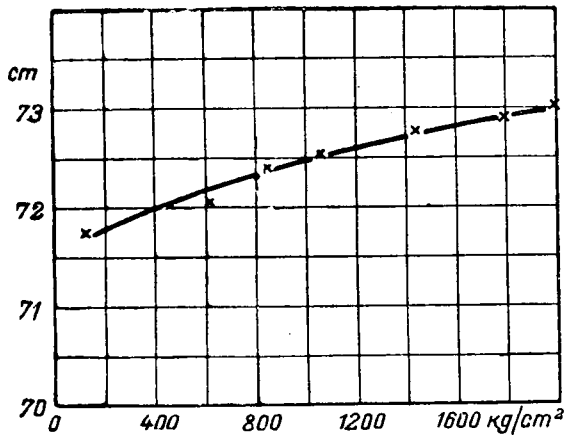


Рис. 5. Емкость конденсатора из титаната бария в зависимости от давления.

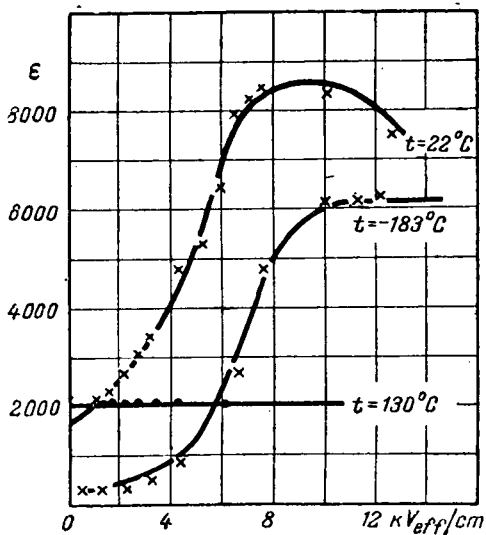


Рис. 6. Диэлектрическая проницаемость титаната бария в зависимости от напряженности поля частоты 50 Hz при разных температурах.

быть поведение температурного коэффициента диэлектрической проницаемости—величины $\frac{1}{\epsilon} \frac{d\epsilon}{dt}$.

У титаната бария $\frac{1}{\epsilon} \frac{d\epsilon}{dt}$ составляет в интервале температуры от 77° К до 4° К около 1% и от 4° К до 2° К около 0,5%, т. е. в 15 раз больше, чем у каменной соли при комнатной температуре.

Измерения при разных температурах были сделаны при напряжении в несколько вольт на частоте около миллиона периодов в секунду. При комнатной температуре были проведены измерения также и на других частотах от 50 Hz до 150 млн. Hz в секунду, при напряжениях, не превышающих несколько десятков вольт. Было обнаружено, что в этом диапазоне частот величина диэлектрической проницаемости остается практически постоянной. Большая величина диэлектрической проницаемости и резкая зависимость ее от температуры позволили надеяться, что можно будет у титаната бария обнаружить также изменение диэлектрической проницаемости в зависимости от давления. Исследование

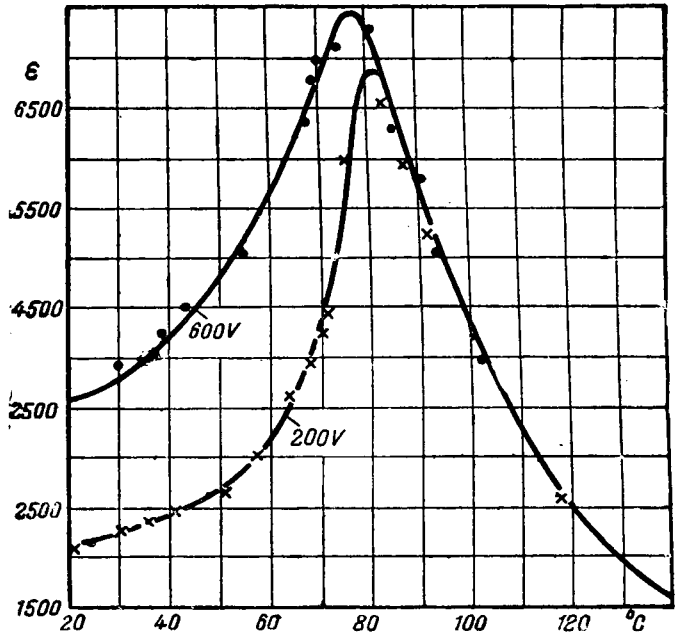


Рис. 7. Диэлектрическая проницаемость титаната бария в зависимости от температуры при разных напряжениях.

при высоких давлениях было проведено совместно с Л. Ф. Верещагиным в Институте органической химии Академии наук СССР. Как показали измерения при увеличении давления, диэлектрическая проницаемость возрастает, причем относительное возрастание уменьшается с увеличением давления. В диапазоне от 300 до 2000 ат относительное изменение составляло около 10^{-5} cm²/kg. Результаты измерений при высоких давлениях приведены на рис. 5.

Большое значение в раскрытии особенностей титаната бария имели измерения диэлектрической проницаемости при разных напряжениях. Это исследование было проведено совместно с И. М. Гольдман. Диэлектрическая проницаемость обычных электроизолирующих материалов практически не зависит от напряжения. Весьма малые отклонения могут иметь место только в очень сильных электрических полях. Измерения, проведенные вначале посредством моста Шеринга, показали, что у титаната бария при комнатной температуре диэлектрическая проницаемость плавно возрастает с увеличением напряженности поля и достигает предельного значения при напряженности поля в несколько тысяч вольт на см; при дальнейшем увеличении напряжения наблюдается тенденция к уменьшению, которую нельзя далеко проследить, так как наступает пробой—разрушение материала. Такого же характера зависимость диэлектрической проницаемости от напряжения при температуре жидкого кислорода, при — 183° С.

Совершенно иначе ведет себя титанат бария при высоких температурах. Например, при температуре + 130° С диэлектрическая проницаемость остается неизменной вплоть до наибольшей при этих измерениях напряженности полей в 6 kV/cm. Результаты этих измерений приведены на рис. 6. На рис. 7 приведены результаты измерений диэлектрической проницаемости в зависи-

мости от температуры для разных напряжений. Из этих данных видно, что температура, соответствующая максимуму диэлектрической проницаемости, является пределом, выше которого титанат бария ведет себя как обычный диэлектрик, а ниже обнаруживает сильную зависимость диэлектрического коэффициента от напряжения, не свойственную обычным материалам.

Своеобразная зависимость диэлектрической проницаемости титаната бария от напряженности электрического поля указывала на то, что поляризация в нем должна обладать некоторыми особенностями в отличие от обычных материалов.

Для установления связи между мгновенными значениями величины поляризации и приложенного напряжения были произведены измерения с помощью катодного осциллографа по известной схеме, показанной на рис. 8. Измерения показали, что титанат бария обладает *диэлектрическим гистерезисом*. Осциллограммы, снятые при разных температурах, приведены на рис. 9а и 9б. Они показывают, что диэлектрический гистерезис проявляется в титанате бария только при температуре ниже $+80^\circ\text{C}$, т. е. в той же области температур, при которых обнаруживается резкая зависимость диэлектрической проницаемости от напряжения.

IV. Титанат бария — новый сегнетоэлектрик. Диэлектрический гистерезис, вид зависимости диэлектрической проницаемости от напряжения, наличие резко выраженного максимума в зависимости диэлектрической проницаемости от температуры показывают, что титанат бария является сегнетоэлектриком или *ферроэлектриком*. Так называют диэлектрики, которые обладают *спонтанной поляризацией*. В некоторой мере сегнетоэлектрик по отношению к диэлектрическим свойствам является аналогом ферромагнетиков по отношению к магнитным свойствам. До настоящего времени как сегнетоэлектрики известны две группы материалов: сегнетова соль — двойная натрокалиевая соль винной кислоты ($\text{NaKC}_1\text{H}_4\text{O}_6 \times 4\text{H}_2\text{O}$) и ее смешанные кристаллы и изоморфные соли (KH_2AsO_4 и KH_2PO_4). Первая группа была изучена И. В. Курчатовым свыше 10 лет назад

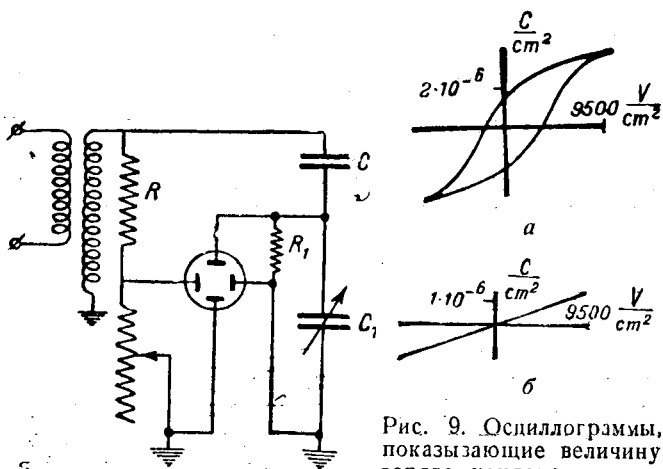


Рис. 9. Осциллограммы, показывающие величину заряда конденсатора из титаната бария в зависимости от напряженности поля: а — при 20°C ; б — при 104°C .

[Л. 3]. Вторая группа была открыта в Швейцарии в 1938 г. [Л. 4].

Сегнетова соль обладает сегнетоэлектрическими свойствами только в диапазоне температуры от -18°C до $+23^\circ\text{C}$; KH_2AsO_4 — только при температурах, не превышающих -176°C , и KH_2PO_4 — при температуре, не превышающей -150°C . Температуру, при которой спонтанная поляризация исчезает и материал перестает быть сегнетоэлектриком, называют температурой Кюри, по аналогии с ферромагнитными явлениями.

Титанат бария значительно отличается от известных двух групп сегнетоэлектриков: он не содержит кристаллизационной воды и водорода, присутствием которых связывали сегнетоэлектрические свойства. Он обладает гораздо более простой кристаллической структурой, чем другие сегнетики. Температура Кюри у титаната бария намного выше, чем у других сегнетиков. Во всей области температуры ниже чем $+70^\circ\text{C}$ титанат бария является сегнетоэлектриком. Эта особенность титаната бария, а также простой способ его получения путем обжига открывают возможность создания для электроизоляционной техники нового класса материалов, занимающих среди диэлектриков примерно то же место, как ферромагнетики среди проводников. Диэлектрические свойства титаната бария, насколько нам известно, никем не изучались. В ходе нашей работы в американских научных журналах появились указания на материалы с диэлектрической проницаемостью, превышающей тысячу, без названия этих материалов и указания их химического состава [Л. 5, 6].

Аналогия, хотя и неполная, между сегнетоэлектриками и ферромагнетиками позволяет при описании и толковании некоторых свойств титаната бария следовать учению о ферромагнетизме. Само понятие диэлектрической проницаемости в сегнетоэлектрической области ввиду сложной зависимости поляризации от напряженности электрического поля нуждается в уточнении. Так же как в отношении магнитной проницаемости железа, можно для диэлектрической проницаемости титаната бария ввести следующие определения:

1) общая диэлектрическая проницаемость — ϵ_0 , рассматриваемая как отношение индукции к напряженности электрического поля $\epsilon_0 = \frac{D}{E}$, причем D измеряется на основной кривой гистерезисного цикла;

2) дифференциальная диэлектрическая проницаемость, определяемая как отношение $\epsilon_a = \frac{dD}{dE}$ на основной кривой.

По аналогии с ферромагнетизмом можно считать, что сегнетоэлектрик при отсутствии внешнего электрического поля поляризован, однако, разбит на отдельные области, так называемые области Вейсса. Каждая из областей поляризована, но в сумме поляризация всех областей равна нулю, так как электрический момент одних областей нейтрализуется действием других, с-

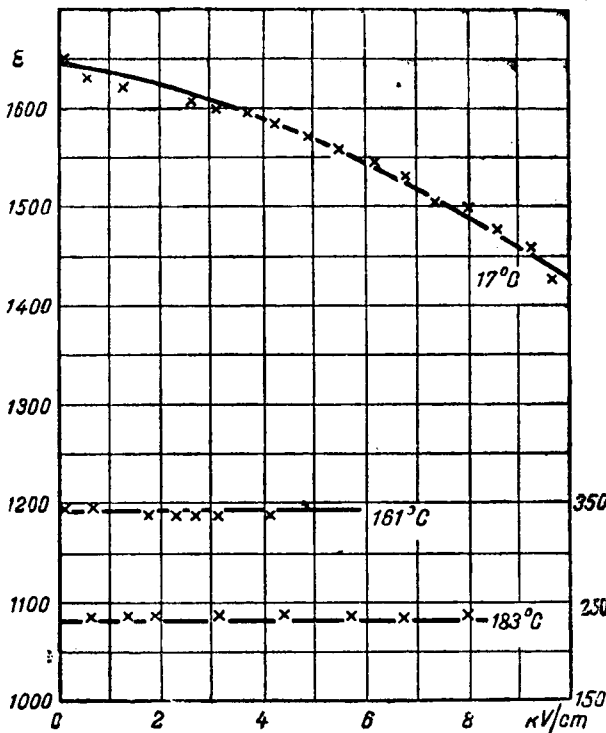


Рис. 10. Реверсивная диэлектрическая проницаемость в зависимости от напряженности постоянного электрического поля.

противоположно направленной поляризацией. Внешнее электрическое поле в таком веществе вызывает поляризацию не только из-за смещения электрических зарядов, но и благодаря ориентации целых областей в электрическом поле. Можно, приложив постоянную разность потенциалов, заставить сегнетик поляризоваться, а затем, наложив малое переменное напряжение, измерить диэлектрическую проницаемость, характеризующую способность вещества к дальнейшей поляризации. Диэлектрическую проницаемость, измеренную таким образом, можно назвать *реверсивной* по аналогии с ферромагнетизмом. При соответствующих измерениях с титаном бария переменное напряжение с амплитудой в 5 В и с частотой $4 \cdot 10^5$ Hz накладывалось на постоянное поляризующее напряжение. Измерения в зависимости от напряженности постоянного поля были сделаны при разных температурах. Результаты измерения приведены на рис. 10.

Из приведенных данных видно, что реверсивная диэлектрическая проницаемость не зависит от напряжения, когда начальное значение ее относительно невелико, что имеет место при очень низких температурах в области сегнетоэлектричества, например, при -183°C , и при высоких температурах, значительно превышающих точку Кюри, например, при $+178^\circ$. Вблизи точки Кюри, когда диэлектрическая проницаемость велика, она обнаруживает зависимость от напряжения даже в слабом электрическом поле.

Кривая диэлектрического гистерезиса у титаната бария сходна по форме с кривой магнитного гистерезиса у железа. Следуя Рэлею в его

работе 1887 г. [Л. 7] о поведении железа и стали под действием слабых магнитных сил, можно прийти к выводу, что в слабом электрическом поле связь между индукцией и напряженностью электрического поля подобна связи между индукцией и напряженностью магнитного поля.

Считаем, что в слабых полях при уменьшении напряженности поля от значения $E = E_1$ до $E = -E_1$ индукция

$$D = \epsilon_n E + \beta E_1^2 \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{E}{E_2} \right)^2 \right\},$$

а при возрастании напряженности поля от значения

$$E = -E_1 \text{ до } E = E_1$$

$$D = \epsilon_n E + \beta E_1^2 \left\{ -1 + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{E}{E_1} \right)^2 \right\}.$$

При гистерезисе на переменном напряжении, когда $E = E_1 \cos \omega t$, индукция в течение полуцикла от $t = 0$ до $t = \frac{\pi}{\omega}$

$$D = \epsilon_n E_1 \cos \omega t + \beta E_1^2 \left\{ \cos \omega t + \frac{1}{2} \sin^2 \omega t \right\},$$

в течение последующего полупериода от $t = \frac{\pi}{\omega}$ до $t = \frac{2\pi}{\omega}$.

$$D = \epsilon_n E_1 \cos \omega t + \beta E_1^2 \left\{ \cos \omega t - \frac{1}{2} \sin^2 \omega t \right\}.$$

Представляя кривую гистерезисного цикла в виде ряда Фурье в промежутке от 0 до $\frac{2\pi}{\omega}$, где ω — круговая частота переменного напряжения, находим, что индукция

$$D = (\epsilon_n + \beta E_1) E_1 \cos \omega t + \frac{4\beta}{\pi} \left(E_1^2 \frac{\sin \omega t}{3} - \frac{\sin 3\omega t}{3,5} - \frac{\sin 5\omega t}{3,5,7} - \dots \right),$$

где E_1 — амплитуда напряженности поля;
 ϵ_n — диэлектрическая проницаемость при $E \rightarrow 0$;

β — коэффициент Рэлея.

Замещая реальный образец эквивалентной схемой из конденсатора, обладающего потерями только на гистерезис, и параллельно подключенного сопротивления R , находим, что под напряжением $U = U_1 \cos \omega t$ ток

$$I = \omega C_0 \left[\frac{1}{R\omega C_0} + \frac{4\beta E_1}{3\pi \epsilon_0} \right] U_1 \cos \omega t - \omega C_0 \left[1 + \frac{\beta E_1}{\epsilon_0} \right] U_1 \sin \omega t - \omega C_0 \frac{4\beta}{5\pi \epsilon_0} U_1 \cos 3\omega t - \dots,$$

где C_0 — емкость образца при $E_1 \rightarrow 0$.

Из последнего равенства следует, что при малых напряжениях поля, емкость конденсатора из титаната бария линейно возрастает с напряжением:

$$C = C_0 \left(1 + \frac{\beta E_1}{\epsilon_n} \right).$$

Данные соответствующих измерений приведены на рис. 11.

Можно показать также, что потери на гистерезисе на 1 цикл в 1 см³ вещества $P_2 = \frac{\beta E_1^3}{3\pi}$.

Сходство между электрическими свойствами титаната бария и магнитными свойствами железа может быть установлено также в других явлениях.

Особые свойства титаната бария как сегнетоэлектрика следует связать, как показал В. Л. Гинзбург, с фазовым переходом второго рода, который должен происходить в титанате бария при температуре, соответствующей максимуму диэлектрической проницаемости, при точке Кюри [Л. 8].

Теория фазовых переходов второго рода была разработана Л. Д. Ландау несколько лет назад [Л. 9]. В отличие от фазовых переходов первого рода, например перехода воды из жидкого состояния в твердое или перехода серы из ромбической в моноклиническую, при которых в точке фазового перехода существуют оба состояния вещества, в точке фазового перехода второго рода, в точке Кюри, вещество находится только в одном состоянии. Если при фазовом превращении первого рода переход из одного состояния в другое совершается скачком, то при фазовом переходе второго рода переход от одной кристаллической модификации к другой совершается также прерывно, но в новообразующейся модификации положение отдельных частиц при температуре, близкой к точке перехода, лишь ничтожно мало отличается от положения этих частиц в старой модификации и отклонения становятся ощутимыми лишь при удалении от точки перехода. При фазовом переходе второго рода новообразующаяся кристаллическая модификация вещества продолжает находиться за точкой Кюри при значительном изменении температуры как бы в состоянии «становления». Естественно, что в этом состоянии вблизи от точки Кюри воздействие внешних факторов, изменяющих энергию, может особенно резко сказываться на свойствах вещества.

В последнее время рентгенографические исследования, выполненные Megaw [Л. 10], и Rooksby [Л. 11], показали, что титанат бария при температуре 200° С обладает идеальной кубической решеткой типа перовскит, а при температуре 20° С тетрагональной, очень близкой к кубической, отличающейся от нее тем, что в одном направлении длина ребра элементарной ячейки примерно на 1% больше, чем в двух других. Таким образом наличие фазового перехода второго рода у титаната бария можно считать достоверным.

Кристаллическая решетка типа перовскит неполярна. Если допустить, что тетрагональная решетка титаната бария полярна и обладает спонтанной электрической поляризацией, то, как показал В. Л. Гинзбург, можно, исходя из теории фазовых переходов второго рода, объяснить ряд экспериментально установленных фактов.

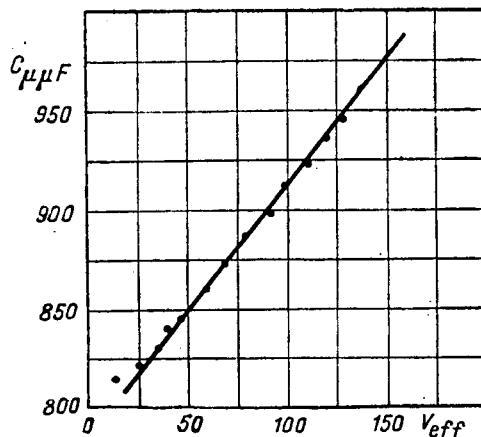


Рис. 11. Емкость конденсатора из титаната бария в зависимости от напряжения в слабых переменных полях.

Как следует из общей теории фазовых переходов второго рода, в данном случае при температуре, близкой к точке Кюри, термодинамический потенциал

$$\Phi(p, T, E) = \Phi_0 + \alpha P^2 + \frac{\beta}{2} P^4 - EP,$$

где Φ_0 — термодинамический потенциал в точке Кюри при $E=0$;

P — электрический момент единицы объема;

E — напряженность электрического поля;

α и β — коэффициенты при разложении Φ в ряд по степеням P , зависящие от давления p и температуры T .

Так как

$$\frac{\partial \Phi}{\partial E} = -P = 2\alpha P \frac{\partial P}{\partial E} + 2\beta P^3 \frac{\partial P}{\partial E} - P - E \frac{\partial P}{\partial E},$$

то

$$E = 2\alpha P + 2\beta P^3.$$

При $E=0$ и при температуре ниже точки Кюри $P=P_0$, где P_0 — спонтанная поляризация и

$$\Phi = \Phi_0 + \alpha P_0^2 + \frac{\beta}{2} P_0^4.$$

Для того чтобы состояние со спонтанной поляризацией было устойчивым, термодинамический потенциал как функция от P_0 должен иметь минимум. Отсюда следует, что

$$P_0^2 = -\frac{\alpha}{\beta}.$$

В слабом электрическом поле выше точки Кюри можно пренебречь членом, содержащим P^3 , и считать, что

$$E = 2\alpha P.$$

Так как диэлектрическая проницаемость

$$\epsilon = 1 + 4\pi \frac{P}{E},$$

то при $T > \theta$

$$\alpha = \frac{2\pi}{\epsilon - 1} \approx \frac{2\pi}{\epsilon}.$$

При $T < \theta$ поляризация

$$P = P_0 + P_1,$$

где P_1 — поляризация кристаллической решетки, вызванная приложенным электрическим полем.

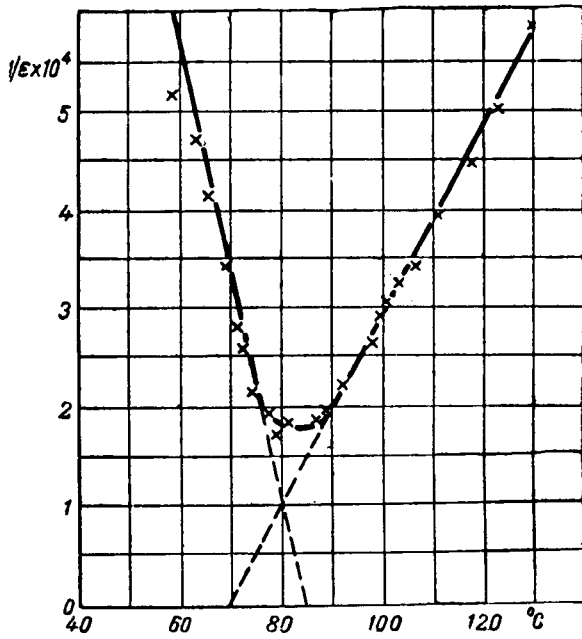


Рис. 12. Обратная диэлектрическая проницаемость в зависимости от температуры вблизи точки Кюри.

Благодаря спонтанной поляризации общая величина поляризации велика, поэтому членом, содержащим P^3 , нельзя пренебречь и

$$E = 2\alpha (P_0 + P_1) + 2\beta (P_0 + P_1)^3. \quad (2)$$

При измерениях емкости на высокой частоте по методу замещения следует считать, что определяемая величина диэлектрической проницаемости $\epsilon = 1 + 4\pi \frac{\partial P}{\partial E}$. Спонтанная поляризация, поскольку величина ее остается постоянной, сказывается только в том, что зависимость между поляризацией и напряженностью поля перестает быть линейной. Из равенства (2) следует, что в весьма слабых электрических полях, когда $P_0 \gg P_1$,

$$2\alpha \frac{\partial P}{\partial E} + 6\beta P_0^2 \frac{\partial P}{\partial E} = 1.$$

Вблизи точки Кюри $P_0^2 = -\frac{\alpha}{\beta}$ и тогда

$$\alpha = \frac{\pi}{\epsilon - 1} \approx -\frac{\pi}{\epsilon}.$$

Так как при температуре выше точки Кюри α положительно, а при температуре ниже точки Кюри α отрицательно, то в точке Кюри при $T = \theta$ $\alpha = 0$, и ϵ при приближении температуры к точке Кюри стремится к очень большому значению, что соответствует экспериментальным данным.

При температуре, близкой к точке Кюри, можно считать, что

$$\alpha = \left(\frac{\partial \alpha}{\partial T} \right)_{T=\theta} (T - \theta).$$

Тогда вблизи точки Кюри

$$\frac{1}{\epsilon} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\partial \alpha}{\partial T} \right)_{T=\theta} (T - \theta) \text{ при } T > \theta$$

и

$$\frac{1}{\epsilon} = -\frac{1}{\pi} \left(\frac{\partial \alpha}{\partial T} \right)_{T=\theta} (T - \theta) \text{ при } T < \theta.$$

Если отсчет температуры вести от точки Кюри, то при температуре, близкой к точке Кюри, обратная величина диэлектрической проницаемости изменяется прямо пропорционально температуре, что аналогично закону Кюри—Вейсса в ферромагнетизме. Коэффициент пропорциональности между $\frac{1}{\epsilon}$ и температурой при $T < \theta$ в два раза больше, чем при $T > \theta$.

Как видно из данных измерений, приведенных на рис. 12 в виде графика $\frac{1}{\epsilon} = \varphi(T)$, линейная зависимость между $\frac{1}{\epsilon}$ и T действительно имеет место как при $T < \theta$, так и при $T > \theta$, однако коэффициент пропорциональности при $T < \theta$ не в два, а примерно в два с половиной раза больше, чем при $T > \theta$. Измерения диэлектрической проницаемости были сделаны с образцом толщиной в 1,2 мм при частоте $4 \cdot 10^5$ Hz и напряжении 5 В.

При фазовых переходах второго рода в точке Кюри происходит скачок теплоемкости без выделения или поглощения тепла.

Так как энтропия $S = -\frac{\partial \Phi}{\partial T}$, то вблизи точки Кюри

$$S_T = S_0 - \frac{\partial \alpha}{\partial T} P_0^2 = S_0 + \frac{\alpha}{\beta} \frac{\partial \alpha}{\partial T}. \quad (3)$$

Так как теплоемкость

$$c_p = T \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_p, \quad (4)$$

то вблизи точки Кюри

$$C_p = C_{p0} + \frac{T}{\beta} \left(\frac{\partial \alpha}{\partial T} \right)^2 - T \frac{\alpha}{\beta^2} \frac{\partial \alpha}{\partial T} \frac{\partial \beta}{\partial T} + T \frac{\alpha}{\beta} \frac{\partial^2 \alpha}{\partial T^2},$$

где C_{p0} — теплоемкость титаната бария, обладающего решеткой типа перовскит; в точке Кюри $\alpha = 0$ и скачок теплоемкости равен

$$\Delta c_\theta = \frac{T}{\beta} \left(\frac{\partial \alpha}{\partial T} \right)_{T=\theta}^2.$$

Зависимость теплоемкости титаната бария от температуры была измерена В. А. Соколовым в Институте общей и неорганической химии Академии наук СССР. Результаты его измерений приведены на рис. 13 (на рисунке также изображена зависимость диэлектрической проницаемости от температуры). Сравнение кривых $\epsilon = U(T)$ и $c_p = v(T)$ показывает, что в той области температуры, в которой диэлектрическая проницаемость имеет резкий температурный максимум, теплоемкость также имеет максимум.

Из равенства (3) и (4) следует, что

$$S - S_0 = \frac{\alpha}{\beta} \frac{d\alpha}{dT} = - \int_T^\theta \frac{c_p - c_{p0}}{T} dT,$$

или

$$P_{0T}^2 = \frac{\int_T^\theta \frac{c_p - c_{p0}}{T} dT}{\frac{d\alpha}{dT}}.$$

По данным измерений теплоемкости можно найти, что

$$\int_T^\theta \frac{c_p - c_{p0}}{T} dT \approx 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ cal/g } ^\circ\text{C},$$

где $T = 339^\circ \text{K}$ и $\theta = 353^\circ \text{K}$. По данным измерений зависимости диэлектрической проницаемости от температуры можно найти, что вблизи точки Кюри

$$\frac{d\alpha}{dT} \approx 7,2 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}}.$$

Принимая удельный вес титаната бария равным $6,2 \text{ g/cm}^3$, находим, что при $+66^\circ\text{C}$ спонтанная поляризация

$$P_0 = 6,6 \cdot 10^{-6} \text{ C/cm}^2.$$

Величина спонтанной поляризации была приближенно найдена также путем непосредственных измерений с помощью катодного осциллографа, использованного в схеме, приведенной на рис. 8. Заряд на конденсаторе из титаната бария измерялся в зависимости от приложенного напряжения. Величина спонтанной поляризации определялась как

$$q_0 = q - q_1,$$

когда величина q_0 достигала насыщения, причем q — измеряемая плотность заряда на обкладках конденсатора, и

$$q_1 = \frac{C_n U}{S},$$

где U — приложенное напряжение;

C_n — емкость конденсатора при $U \rightarrow 0$;

S — поверхность обкладки конденсатора.

q_0 достигало насыщения при температуре $+66^\circ\text{C}$ в электрическом поле, превышающем 10 kV/cm .

Спонтанная поляризация была при этом найдена равной $2,7 \cdot 10^{-6} \text{ C/cm}^2$, что по порядку величины совпадает со значением, вычисленным из результатов измерения температурной зависимости теплоемкости и диэлектрической проницаемости. Следует учесть, что теоретическое рассмотрение относится к монокристаллу, а измерения были сделаны над поликристаллическим материалом.

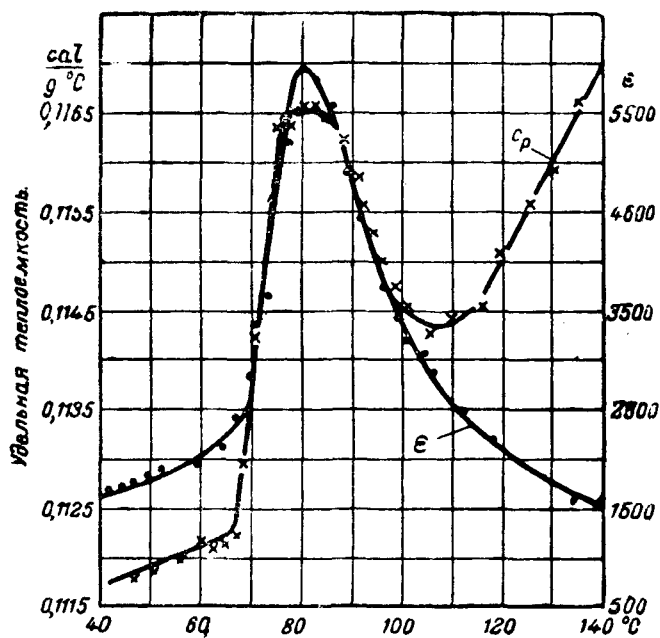


Рис. 13. Теплоемкость и диэлектрическая проницаемость титаната бария в зависимости от температуры вблизи точки Кюри.

Хотя титанат бария как сегнетоэлектрик во многом напоминает железо как ферромагнетик, однако между сегнетоэлектричеством и ферромагнетизмом существует глубокое различие. Ферромагнетизм связан с собственным магнитным моментом электрона. При температуре выше точки Кюри ферромагнитные свойства исчезают, магнитный момент электрона остается. Сегнетоэлектричество связано с электрическим моментом совокупности ионов, определенным образом расположенных в элементарной ячейке кристаллической решетки. При температуре выше точки Кюри изменяется тип решетки, исчезают сегнетоэлектрические свойства и вместе с ними электрический момент элементарной ячейки.

Литература

1. А. Ф. Иоффе и Б. М. Вул. Электричество, стр. 650, № 12, 1931.
 2. Б. М. Вул и Г. И. Сканази. Известия АН СССР, Серия физическая, т. 8, стр. 194, 1944.
 3. И. В. Курчатов. Сегнетоэлектрики. ГТТИ, 1933.
 4. G. Busch. Helv. Phys. Acta, 11, p. 239, 1938.
 5. Russel and Berberich. Electronics, 17, 136, 1944.
 6. Gray. Phys. Rev., 65, 348, 1944.
 7. Rayleigh. Phil. Mag., 23, p. 225, 1887.
 8. В. Л. Гинзбург. Журн. экспериментальной и теоретической физики, 15, стр. 739, 1945.
 9. L. Landau. Phys. Zs. d. Soviet Union 11. 26, 1937; 11, 545, 1937 г.
 10. Л. О. Ландау и Е. Лифшиц. Статистическая физика, 1940.
 11. Megaw. Nature, т. 155, 484, 1945.
 12. Rooksby. Nature, т. 155, 484, 1945.
- Результаты отдельных этапов работы изложены в предварительных сообщениях, обобщенных в данной статье.
Б. М. Вул и И. М. Гольдман. ДАН, 46, стр. 154, 1945; 49, 179, 1945; 51, 21, 1945;
Б. М. Вул и Л. Ф. Верещагин. ДАН, 48, стр. 662, 1945.



Влияние барьеров на электрическую прочность воздушных промежутков

Кандидат техн. наук Н. Ф. ВОЛОЩЕНКО

Москва

Эффектом барьера называют явление повышения пробивного напряжения промежутка при помещении между электродами, приблизительно перпендикулярно к направлению разряда, тонкого диэлектрика. Как было установлено Э. Марксом и Розером [Л. 1, 2], эффективность барьера зависит от полярности электрода большей кривизны, расположения барьера в промежутке и рода напряжения. Следует подчеркнуть, что в данном случае речь идет о повышении пробивного напряжения, вызванном исключительно изменением характера процессов в разрядном промежутке, а не электрической прочностью барьера, которая в случае тонких барьеров из бумаги и других материалов ничтожно мала по сравнению с электрической прочностью промежутка. Понятно, если в качестве барьеров использовать изоляционный материал, пробивное напряжение которого соизмеримо с пробивным напряжением промежутка, то повышение пробивного напряжения будет вызвано не только эффектом барьера, но и его собственной электрической прочностью.

Упомянутыми выше авторами было установлено, что для электродов острие—плоскость наибольшее повышение разрядного напряжения, достигающее 2,5—3-кратного значения разрядного напряжения U_d без барьера, наблюдается при положительной полярности острия и расположения барьера вблизи последнего. Как указывает Маркс, эффект барьера имеет место также при переменном и импульсном напряжениях. Объяснение рассматриваемого эффекта заключается по Марксу в том, что барьер, задерживая разрядный канал, развивающийся от положительного электрода, не задерживает разряда, распространяющегося от катода. Тем самым барьер препятствует образованию положительного объемного заряда, благоприятствующего развитию разряда при положительной полярности острия.

Розер [Л. 2] отмечает, что барьерное действие тем сильнее, чем более неоднородно поле и что применение барьера вызывает также ограничение тока и стабилизацию тлеющего разряда. Эффект барьера Розер объясняет преобразованием электрического поля промежутка положи-

Экспериментальное исследование воздушных промежутков с барьерами показало, что применение барьеров повышает коронное и пробивное напряжения наиболее распространенных в технике промежутков с наиболее низкими значениями пробивных напряжений. Найденные закономерности позволяют сделать заключение о целесообразности применения барьеров в различных высоковольтных конструкциях и аппаратах с целью уменьшения габаритов без снижения разрядных напряжений.

тельными объемными зарядами, оседающими на барьере. При этом барьер начинает играть роль плоского электрода положительной полярности с потенциалом, несущественно отличающимся от потенциала острия, так

как падение напряжения на ионизированном участке между ними невелико. Ознакомление с литературой по данному вопросу (см. перечень) позволяет заключить, что наши представления о барьерном эффекте в воздухе являются далеко не полными. Это препятствует более широкому применению барьеров в воздухе и в газонаполненной аппаратуре.

Зависимость пробивного напряжения от положения барьера в промежутке. Исследование зависимости пробивного напряжения воздушных промежутков от положения барьера производилось при переменном и постоянном токах для барьеров из чертежной бумаги, помещаемых между электродами: острие—плоскость, острие—шар, острие—острие, коаксиальные цилиндры, провод—плоскость, шар—шар и плоскость—плоскость. Источником переменного тока частоты 50 Hz служили испытательные трансформаторы, постоянного тока—кенотронная установка, собранная по схеме удвоения напряжения. Напряжение измерялось при помощи стандартного измерительного шарового разрядника и регулировалось потенциал-регулятором.

Электроды острие—плоскость. В качестве электродов применялись медная плоскость с закругленными краями и стержень, заостренный, с углом растворения 30° . Конец острия несколько затуплялся с целью избежать изменения разрядного напряжения в результате многочисленных пробоев. Барьеры из чертежной бумаги толщиной $d = 0,23$ mm располагались параллельно плоскости и жестко закреплялись в деревянной стойке с помощью специальных приспособлений, что исключало возможность вытягивания их под действием потоков воздуха при разряде. Напряжение во всех случаях плавно поднималось до пробивного.

Результаты измерений представлены кривыми на рис. 1—для постоянного тока и рис. 2—для переменного тока. Каждая точка кривой полу-

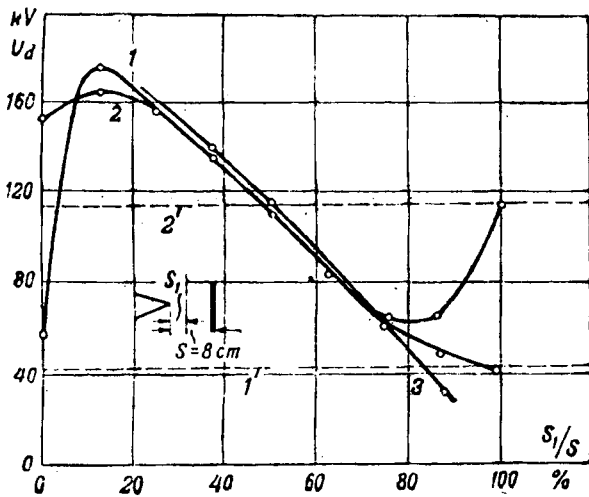


Рис. 1. Электроды острие—плоскость.

1, 2—острие положительно; 2, 2'—острие отрицательно (U и 2'—без барьера). Кривая 3—плоские электроды с краями по Роговскому.

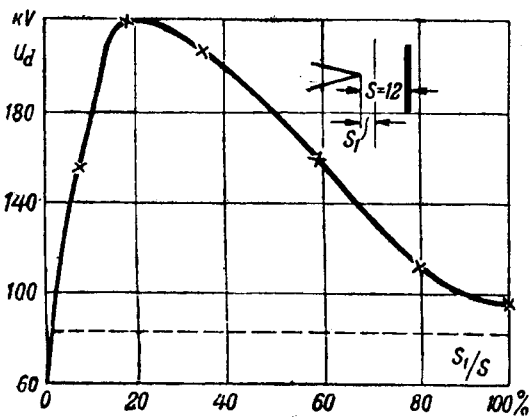


Рис. 2. Электроды острие—плоскость, переменное напряжение частоты 50 Гц.

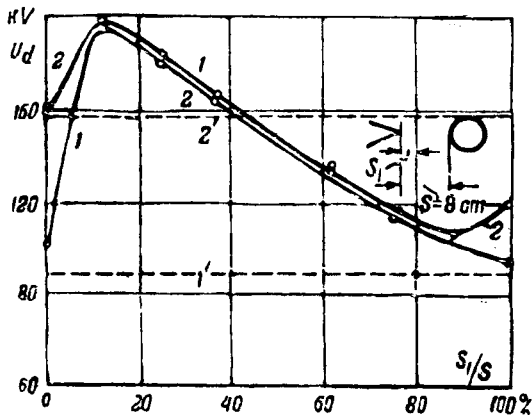


Рис. 3. Электроды острие—шар.

1—острие положительно; 2—отрицательно.

чена, как среднее из трех измерений. Разброс значений пробивных напряжений, как правило, не превышал 1—3%.

Заслуживает внимания следующее: 1) характер кривых не зависит от расстояния S между электродами (измерения производились для расстояний от 6 до 12 см); 2) кривые обеих полярностей (1 и 2) совпадают за исключением не-

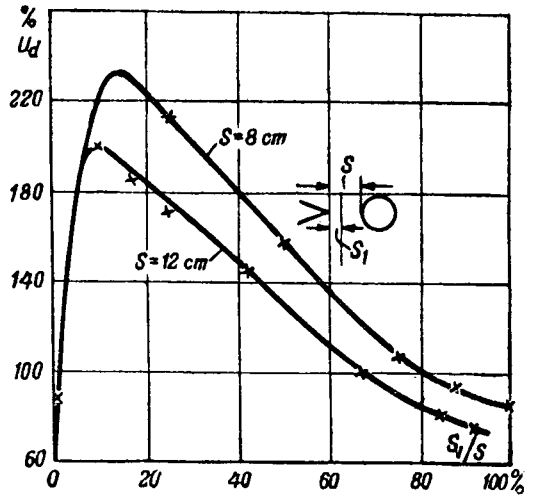


Рис. 4. Электроды острие—шар; острие положительно (разрядное напряжение дано в процентах от U_d при отсутствии барьера).

больших участков у электродов; 3) максимумы этих кривых лежат вблизи острия, приблизительно на одинаковом расстоянии от него, но если пробивное напряжение при + игле достигает в максимуме 410% соответствующего значения без барьера, то при игле оно равно только 147%; 4) характер кривой при переменном токе такой же, как и для положительной полярности иглы при постоянном токе. Явление резкого снижения кривой 1 при расположении барьера у острия будет рассмотрено ниже.

Электроды острие — шар. На рис. 3 даны те же зависимости для электродов острие — шар при $S=8$. Диаметр шара 10 см. Характер кривых остался таким же, как и в случае электродов острие — плоскость, что и понятно, так как конфигурация поля изменилась сравнительно мало. На рис. 4 сопоставлены кривые для этих же электродов при положительной полярности острия и $S=8$ и 12 см. Как видно, увеличение расстояния между электродами S снижает барьерный эффект.

Электроды острие — острие. Кривая рис. 5 получена при постоянном токе. Такого же характера кривые получены и при переменном токе. Большой максимум на рис. 5 соответствует положению барьера вблизи острия положительной полярности, меньший — отрицательной. Максимальное разрядное напряжение в этом случае значительно ниже, чем у несимметричных электродов острие — плоскость. Применением двух барьеров, симметрично располагаемых относительно электродов, можно повысить барьерный эффект данного устройства. В этом случае зависимость пробивного напряжения от $\frac{S_1}{S}$, где

S_1 представляет суммарное расстояние барьеров от острий, а $S=8$ см, в случае постоянного тока представлена кривой рис. 6.

Цилиндрический конденсатор. Радиус внешнего цилиндра с закругленными по поверхности Роговского краями $R=8,35$ см. В первом опыте (рис. 7) радиус внутреннего цилиндра $r=1,18$ мм, во втором (рис. 8) $r=3$ мм.

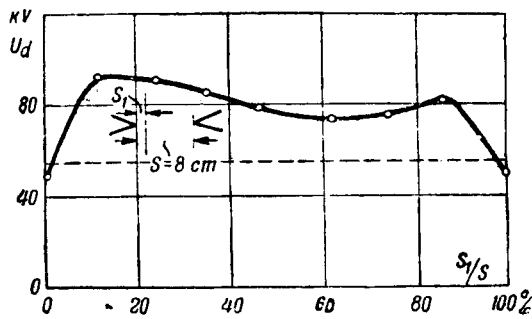


Рис. 5. Электроды острие—острие постоянный ток.

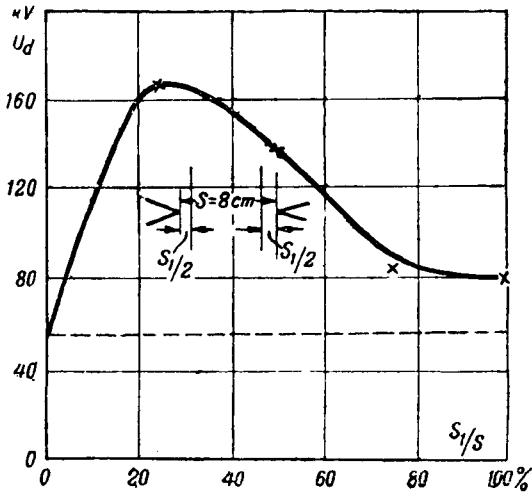


Рис. 6. Электроды острие—острие, постоянный ток.

Барьеры, сделанные из чертежной бумаги, имели цилиндрическую форму и устанавливались коаксиально с конденсатором. Данные измерений (рис. 7 и 8) для постоянного тока кажутся несколько неожиданными. При меньшем радиусе внутреннего цилиндра эффект барьера оказался отрицательным, причем снижение пробивного напряжения на максимуме кривых для обеих полярностей оказывается примерно одинаковым, достигая 16—20% U_a без барьера. При $r = 3$ мм максимум кривой для положительной полярности внутреннего цилиндра (коронирующего электрода) лежит на 22% выше пробивного напряжения промежутка без барьера. Таким образом увеличение неоднородности поля (уменьшение r) в цилиндрическом конденсаторе сопровождается снижением эффекта барьера.

Электроды провод—плоскость. Во избежание преждевременных пробоев электрическое поле у краев электродов выравнивалось с помощью шаров. Барьеры располагались параллельно плоскости. В первом опыте (рис. 9) применялся провод радиусом $r = 0,375$ мм при расстоянии между электродами $S = 5,7$ см; во втором $r = 1,165$ мм при $S = 5,9$ см. Результаты опытов (рис. 9 и 10) в значительной степени напоминают результаты, полученные для цилиндрического конденсатора, что не должно удивлять, так как структура электрического поля осталась приблизительно той же. В отличие от кривых

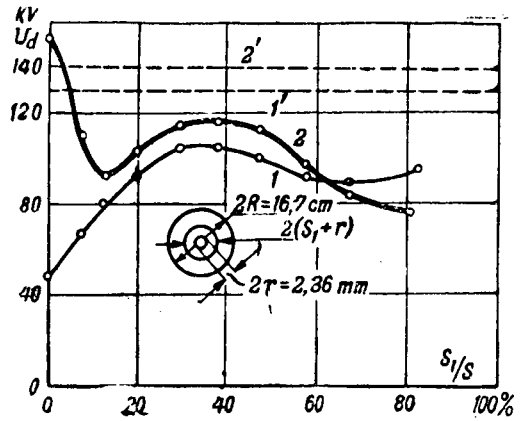


Рис. 7. Цилиндрический конденсатор, края внешнего цилиндра закруглены по Роговскому.

1, 1'—провод положительный; 2, 2'—провод отрицательный.

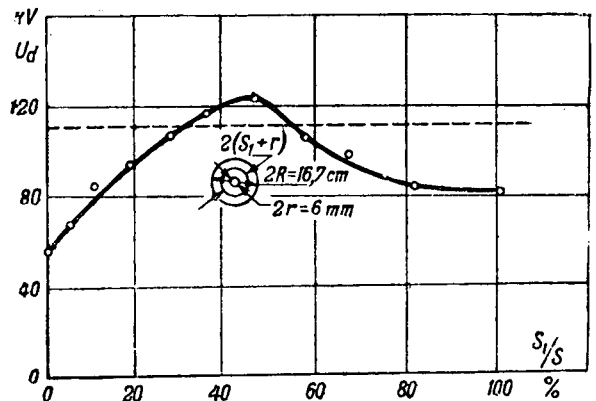


Рис. 8. Цилиндрический конденсатор, края внешнего цилиндра закруглены по Роговскому (постоянный ток).

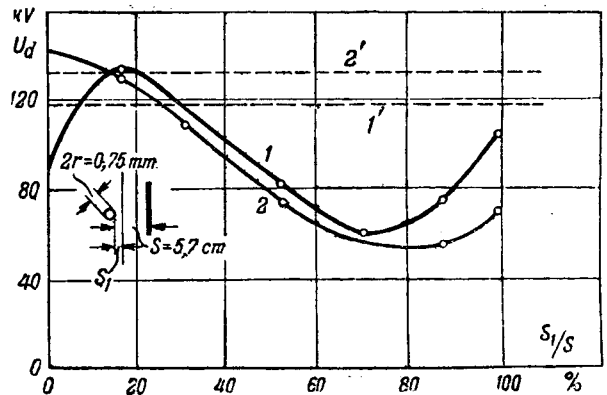


Рис. 9. Электроды провод—плоскость.

1, 1'—провод положительный; 2, 2'—отрицательный (электрическое поле у краев выравнивалось при помощи шаров).

рис. 7 и 8 здесь отчетливо наблюдается минимум при положении барьера вблизи плоскости. Как в цилиндрическом конденсаторе, так и в данном промежутке с увеличением радиуса провода максимум на кривых смещается в сторону возрастающих значений S_1 (S_1 отсчитывается от провода).

Барьеры в однородных полях. Исследованию подвергались промежутки между плоскими электродами с краями, закругленными по поверхности Роговского, и шарами диаметром 12,5 см. При постоянном токе характер кривых для обоих

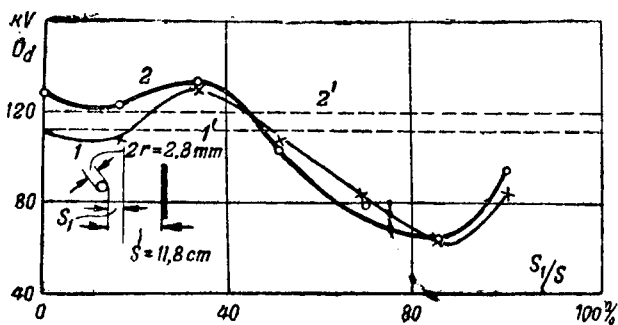


Рис. 10. Электроды провод—плоскость.

1, 1b—провод положительный; 2, 2'—отрицательный (электрическое поле у краев выравнивалось при помощи шаров).

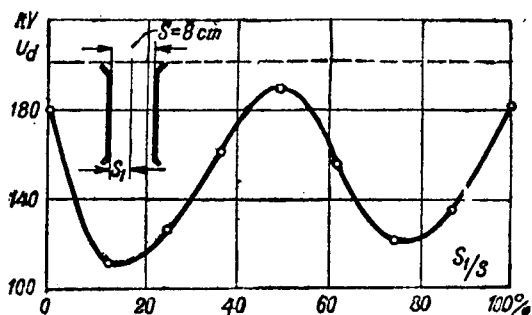


Рис. 11. Плоские электроды, края закруглены по Роговскому (постоянный ток).

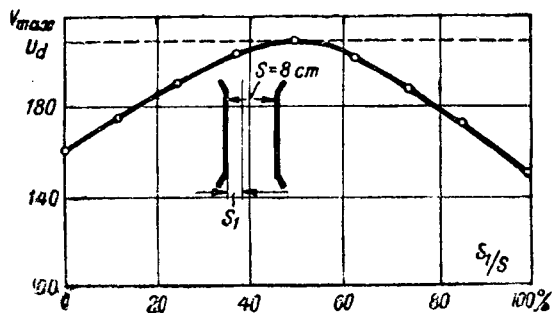


Рис. 12. Плоские электроды, края закруглены по Роговскому (переменный ток).

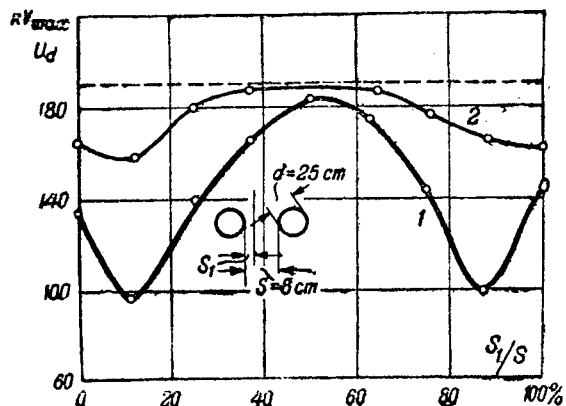


Рис. 13. Шары.

1—барьер из чертежной бумаги; 2—из пористой универсальной научной библиотеки

промежутков одинаков, поэтому ограничиваемся приведением кривых рис. 11 для плоских электродов при расстоянии между ними 8 см. На рис. 12 приведена та же кривая при переменном токе, а на рис. 13 при переменном токе для шаров. Максимумы на кривых соответствуют положению барьера в середине промежутка, где искажение барьером начального однородного поля — наименьшее, так как барьер расположен по эквипотенциальной поверхности. Повидимому, по тем же причинам обнаруживается повышение U_d на рис. 12 и 13 при помещении барьера вплотную у электродов.

Барьеры в технических аппаратах. Исследовалось действие барьера в промежутке между вводом трансформатора на номинальное напряжение 45 кВ и плоской стенкой колонки в кенотронно-газотронной установке. Расстояние между металлическим кольцом ввода, эскиз которого дан в рис. 14, и стенкой $S = 11$ см.

Барьеры из чертежной бумаги в форме цилиндров устанавливались коаксиально вводу. Расстояние S_1 измерялось от наружного диаметра кольца ввода. Из полученной зависимости $U_d = f\left(\frac{S_1}{S}\right)$, представленной графически на рис. 15, видно, что наибольшее повышение разрядного напряжения, достигающее 170% U_d без барьера, имеет место при $\frac{S_1}{S} = 20 \div 30\%$, где

и целесообразно помещать барьер. Разряд начинается с острой кромки кольца ввода (рис. 14), т. е. с острия, и, естественно, что кривая напоминает кривые рис. 1 и 2.

Металлические барьеры. Металлические барьеры из трансформаторного железа толщиной 0,5 мм устанавливались в промежутке острие—шар при расстоянии между электродами 4, 6, 8, 10 и 12 см. Характер кривых при всех этих расстояниях одинаков. На рис. 16 приведены кривые для $S = 8$. Для сравнения на том же рисунке помещена кривая $U_d = f(S)$ для промежутка с электродами плоскость—шар. Кривые $U_d = f(S_1)$, где S_1 отсчитывается от острия, лежат выше кривой $U_d = f(S)$. С увеличением расстояния между электродами максимум кривых, характеризующих промежутки с барьерами, смещается в сторону возрастающих S_1 , причем после максимума кривые почти совмещаются. В связи с этим совпадение кривых для изолирующих и металлических барьеров, имеющее место при малых расстояниях между электродами порядка 4—8 см, нарушается, а при $S = 12$ см наблюдается уже значительное расхождение.

Барьеры при импульсах. Исследование было проведено для промежутка с электродами острие—плоскость при $S = 12$ см стандартной волной $\pm 1,5/40$ мкс и $\pm 1,5/100$ мкс методом минимального разрядного напряжения, при котором 50% ударов импульсного генератора вызывают разряд на объекте. Форма и размеры волны контролировались катодным осциллографом.

Результаты эксперимента представлены на рис. 17. Как видно, положительный эффект барье-

ра обнаруживается только при положительных импульсах. Кривые в этом случае подобны кривым при положительной полярности острия и постоянном токе со следующими исключениями: 1) при $S_1 = 1-2$ см наблюдается значительный разброс значений пробивных напряжений (заштрихованная область рис. 17) и 2) прочность промежутка несколько повышена, когда барьер примыкает вплотную к острию. В этом случае обнаруживается зависимость пробивного напряжения от наличия в барьере следов от пробоев. Интересно отметить, что при импульсах барьерный эффект полностью отсутствует у барьеров пористых, например из ткани редкого переплетения (бязи) и т. п.

Влияние различных факторов на барьерный эффект. Материал барьера. Исследование роли материала барьеров производилось в промежутках, характеризующихся высоким барьерным действием: острие — шар, острие — плоскость при положительной полярности острия и при переменном токе. Барьеры устанавливались на расстоянии $S_1 = 4$ см от острия, при расстоянии между электродами 8 см. В табл. 1 приводятся данные, полученные для промежутка острие — шар на постоянном токе. В таблице дано среднее значение напряжения из трех измерений.

Очевидно, материал барьера практически не оказывает влияния на его действие. Результаты измерений при переменном токе приводят к таким же выводам. Обращает на себя внимание тот факт, что даже марля с отверстиями порядка 1 mm^2 обладает барьерным эффектом. Но применение материалов с более высокой электрической прочностью, например прессшпана или картона толщиной 2 мм и выше, уже повышает пробивное напряжение (рис. 13), в особенности при малых расстояниях барьера от острия.

Барьеры с отверстиями. Как видно из предыдущего, наличие отверстий в барьере не вызывает снижения разрядного напряжения. Но это

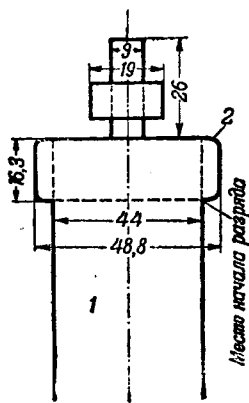


Рис. 14. Эскиз ввода. 1 — гетинакс; 2 — металлическое кольцо (расстояние S_1 в опытах рис. 15 измерялось от кольца 2).

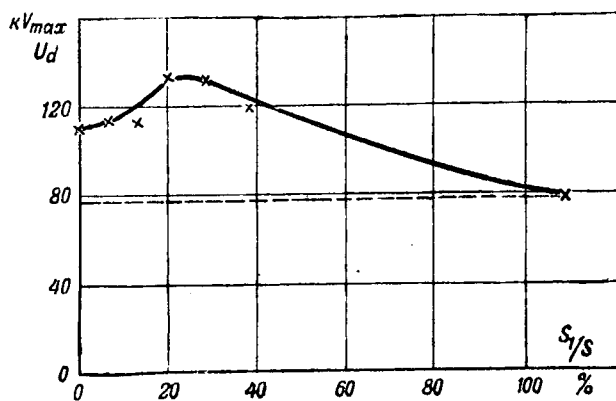


Рис. 15. Эффект барьера коаксиального ввода (рис. 14) на разряд между вводом и стенкой.

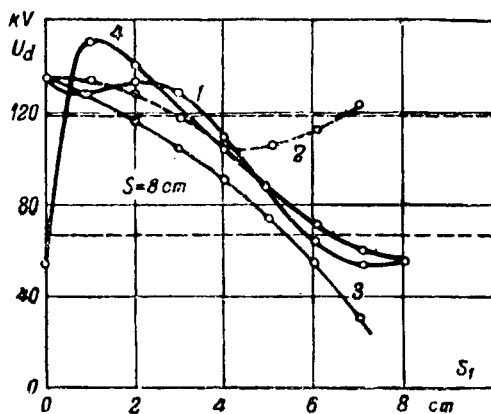


Рис. 16. Металлический барьер и электроды острие — шар. 1 — острие положительно; 2 — отрицательно (отсчет S_1 от острия). Для сравнения приведены кривые: 3 — без барьера, электроды плоскость — шар, разрядное напряжение дано в зависимости от S_1 ; 4 — бумажный барьер (- шар).

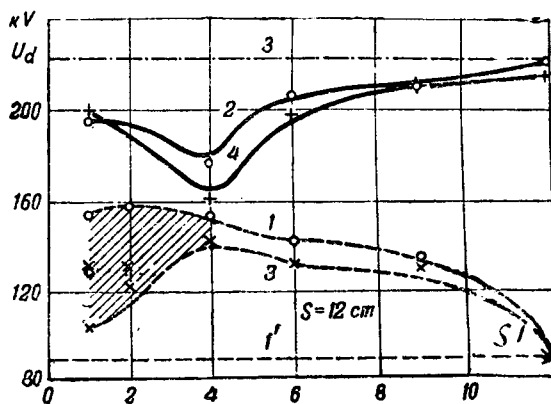


Рис. 17. Барьеры при импульсах. Электроды острие — плоскость.

1, 1' — волна $+1,5/40 \mu\text{sec}$; 2 — волна $-1,5/40 \mu\text{sec}$; 3, 3' — волна $+1,5/100 \mu\text{sec}$; 4 — волна $-1,5/100 \mu\text{sec}$.

Таблица 1
Эффект материала барьера. Электроды острие — шар, постоянный ток

Материал	Толщина барьера, мм	Пробивное напряжение, кВ
Без барьера	—	65
Чертежная бумага	0,23	106
Полотняная калька	0,18	111
Полотняная бязь	0,18	107,5
Марля (отверстия $1 \times 1 \text{ mm}$)	—	105
Прессшпан твердый	0,51	103
Лакоткань	0,20	106
Чертежная бумага, покрытая полупров. лаком	0,23	106
Железо трансформаторное	0,5	110,7

положение не подтвердилось для случаев, когда барьер находится в соприкосновении с коронирующим электродом в неоднородных полях или с любым электродом в однородном электрическом поле. В табл. 2 приводятся результаты измерений пробивных напряжений при последовательных пробоях промежутка без смены барьера.

Непосредственные наблюдения показывают, что в однородном поле при помещении барьера у одного из электродов последующие пробои осу-

ществляются через отверстия, образовавшиеся при первом пробое и при более низких значениях напряжения. Это же положение оказывается справедливым и для промежутка с электродами + острое — плоскость, когда барьер соприкасается с острием. Низкие значения пробивных напряжений в этом случае (рис. 1, 2) объясняются тем, что в бумажном барьере легко образуются отверстия во время подъема напряжения, так что первый пробой происходит уже по готовому каналу. Если же использовать для барьера материал, где образование каналов затруднено, например прессшпан, стекло, то пробивное напряжение при первом пробое значительно выше, чем при последующих (табл. 2).

Таблица 2

Эффект отверстий в барьере в случае примыкания барьера к электроду

Форма электродов	S_1, cm	Пробивное напряжен.					Примечание
		1-й пробой	2-й пробой	3-й пробой	4-й пробой	5-й пробой	
Постоянное напряжение							
Шары диаметром 12,5 см $S = 8 \text{ cm}$	0	160	80	70	70	50	S_1 отсчитывается от +шара Барьеры из чертежной бумаги
	8	152	85	100	102	105	
	8	157	150	147	140	—	
Плоскость—плоскость $S = 8 \text{ cm}$	0	180	150	125	118	100	
	8	180	160	—	—	—	
	6	115	125	120	—	—	
	4	185	195	—	—	—	
+ острое — плоскость $S = 15 \text{ cm}$	0	80	80	—	—	—	Барьер из чертежной бумаги Барьер из прессшпана Без барьера
	0	165	90	88	—	—	
	—	80	82	80	—	—	
Переменное напряжение							
Шары диаметром 12,5 см $S = 8 \text{ cm}$	0	100	100	90	80	80	Барьер из картона То же
	8	100	92	80	80	—	
	3	115	116	116	—	—	
Острие—плоскость $S = 8 \text{ cm}$	0	52	52	52	—	—	Пробой через дыры от прежних разрядов Без барьеров
	4	72	72	76	76	—	
	—	64	64	64	64	—	

Следует отметить, что в резко неоднородных полях подобная зависимость иногда обнаруживается и тогда, когда барьеры расположены на некотором расстоянии от острия. Для барьеров характерны в этом случае более низкие значения

пробивных напряжений. Исследования барьеров с круглыми отверстиями различных диаметров при $S_1 = 1 \text{ cm}$ от + острия показали, что дыры диаметром до 20—30 mm почти не влияют на величину пробивного напряжения промежутка. Пробивное напряжение также не зависит от величины площади барьера, вплоть до наступления разряда по краю барьера.

Заключение. Барьеры вызывают значительное повышение пробивного напряжения в воздушных промежутках с коронирующими электродами, для которых характерны особенно низкие значения пробивного напряжения. К ним относятся: острое — плоскость, острое — шар, острое — острое при переменном токе, а также при положительной полярности острия при постоянном токе и импульсах. В промежутках этой группы объемный заряд, образующийся в результате ионизации у коронирующего электрода, искажая первоначальное поле, благоприятствует развитию разряда и переходу его в искровый при отсутствии барьера. В тех же промежутках при постоянном токе при отрицательной полярности острия, а также в цилиндрическом конденсаторе и электродах провод — плоскость, повышение пробивного напряжения в результате применения барьеров незначительно. В этих промежутках объемный заряд (в отсутствие барьера) вызывает искажение поля, затрудняющее дальнейшее развитие разряда и переход его в искровой. В промежутках с однородным полем барьеры вызывают снижение пробивного напряжения.

Таким образом применение барьеров наиболее целесообразно в промежутках первой группы, т. е. в промежутках, наиболее распространенных в высоковольтных конструкциях и аппаратах. Кроме того, было установлено, что свечение у поверхности внутреннего цилиндра в цилиндрическом конденсаторе, у поверхности провода, в случае электродов провод — плоскость с барьером, не возникает вплоть до пробоя, а сила тока предварительных разрядов снижается до очень малых величин (протекает только обходный ток за счет ионов, огибающих барьер). Поэтому представляется целесообразным применять барьеры в конструкциях, имеющих поля такого же строения, с целью повысить коронное напряжение устройства.

В заключение автор считает своим долгом отметить, что доцент МЭИ П. В. Борисоглебский дал ему ряд ценных советов и участвовал в обсуждении этой работы.

Литература

1. E. Marx. Der Durchschlag der Luft im unhomogenen elektrischen Felde bei verschiedenen Spannungsarten. ETZ, H. 33, 1930.
2. H. Roser. Schlime zur Erhöhung der Durchschlagspannung in Luft. ETZ, H. 17, 1932.
3. Б. М. Вул и И. М. Гольдман. Пробой жидкого азота в неоднородном электрическом поле. ЖТФ, т. VI, вып. 2, 1936.
4. А. Рот. Техника высоких напряжений, 1930.

Эффект высокой интенсивности в вольтовой дуге постоянного тока между угольными электродами

Доктор техн. наук, проф. Н. А. КАРЯКИН

Всесоюзный электротехнический институт

1. Образование кратера.

Исследования дуги высокой интенсивности с помощью характеристических кривых показали, что развитие этого эффекта связано с появлением кратера на аноде. Отсюда понятен интерес к вопросу о причинах и механизме образования кратера на аноде дуги высокой интенсивности. Имеющиеся в литературе [1, 2] сведения по этому вопросу недостаточны.

Изучение вопроса об образовании кратера мы производили путем наблюдения за изменением его глубины, диаметра и формы во время снятия характеристических кривых при одновременном наблюдении структуры пламени дуги.

Развитие кратера и изменение структуры пламени. Наблюдения за развитием кратера при последовательном увеличении силы тока дуги обнаружили ряд интересных моментов в этом процессе, одним из которых является начальное горение нового экземпляра положительного угля при малой силе тока дуги.

В нашем опыте с углями типа 16-150 при длине дуги $L=30$ мм, высоте расположения катода $y=2$ мм и при минимальной силе тока $i_{\min}=60$ А за одну-две первые минуты горения дуги на аноде выгорал кратер глубиной $h=1$ мм, а диаметр анода несколько уменьшался. Если ток оставляли неизменным на время больше 10 мин, то кратер исчезал, конец положительного угля сильно заострялся так, что диаметр анода лишь на 1—2 мм превышал диаметр фитиля угля, а напряжение на дуге уменьшалось приблизительно на 8—10% от его значения при выгоревшем кратере.

При дальнейшем горении дуги с той же силой тока все ее основные характеристики не менялись. Анод при этом получался плоский или выпуклый. Степень выпуклости зависела от силы тока, расположения отрицательного угля, а также от типа углей. При увеличении силы тока выпуклость анода уменьшалась и при токе, близком к началу развития эффекта высокой интенсивности, анод становился плоским. При дальнейшем увеличении тока на аноде выгорал кратер.

Изучается процесс развития кратера на аноде дуги. Выясняются причины и механизм образования кратера. Дается общая схема процесса развития эффекта высокой интенсивности и объясняется ход каждой характеристической кривой дуги. Дается определение сущности явления эффекта высокой интенсивности. Статья является продолжением предыдущих работ автора (Электричество, № 8 и № 11, 1945).

Интересны наблюдения за изменением основных характеристик дуги в начальный период горения нового экземпляра положительного угля при номинальной силе тока дуги. Опыты проводились с углями типа 16-150

марки ПИГ. Дуга горела при силе тока в 150 А и напряжении в 79 В, поддерживаемых постоянными с помощью автомата дуговой лампы.

Таблица 1

Время горения дуги, min	0,5	5—10	10—15	15—20	20—30	30—40
Яркость кратера, ksb	55,4	57,6	58,1	58,4	58,2	58,5
Диаметр анода, мм .	14,0	13,8	13,8	13,6	13,5	13,6
Глубина кратера, мм	9,2	8,6	8,3	8,1	8,2	8,1
Расход положительного угля, мм/ч . .	238	276	286	293	300	300

Результаты наблюдений (табл. 1) показывают, что стационарное горение дуги достигается лишь по истечении приблизительно 20 мин с момента ее включения с новым экземпляром положительного угля. В течение этих 20 мин в начальный период горения яркость кратера непрерывно растет, повышаясь в общем приблизительно на 6%. Диаметр анода и глубина кратера уменьшаются: первый на 0,5 мм, а вторая на 1 мм. Расход положительного угля возрастает за то же время приблизительно на 20%.

Последующие опыты показали, что время начального, нестационарного горения не остается одинаковым для углей разных типов, кроме того, оно получается различным при работе углей в дуговых лампах разных конструкций.

Как известно, структура отрицательного пламени дуги высокой интенсивности при увеличении силы тока изменяется. Изменение состоит в том, что всегда при токе дуги около 80 А в центральной части пламени появляется более яркий пучок, который при дальнейшем увеличении силы тока растет по диаметру, заполняя собой отрицательное пламя в большей мере. При снятии характеристических кривых дуги, которые были изображены на рис. 2 [Л. 3], наблюдались следующие изменения в строении пламени дуги.

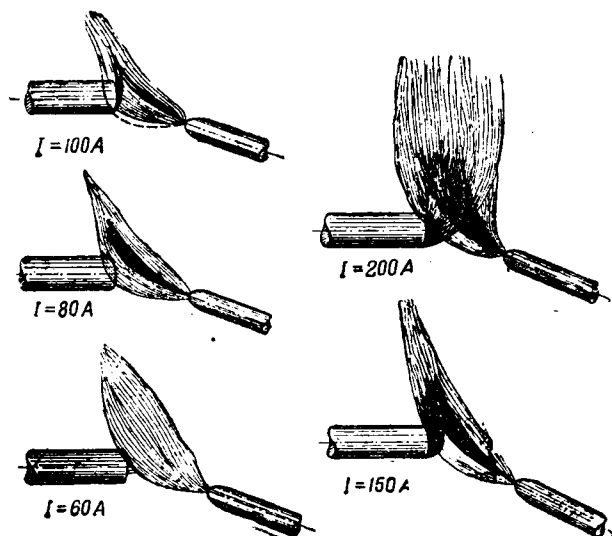


Рис. 1.

При минимальной в опыте силе тока дуги в 60 А отрицательное пламя было без центрального пучка (рис. 1). Оно не касалось нижней частью положительного угля, будучи несколько приподнятым, и доходило до верхней половины угля, частично распространялось по его оболочке. Причиной подъема отрицательного пламени можно считать конвекционные токи, оказывающие на пламя большее действие при малом токе, когда направленное действие отрицательного пламени вдоль оси угля сравнительно мало.

При силе тока в 70 А направленное действие отрицательного пламени вдоль оси угля становилось больше; благодаря этому нижний край пламени несколько опускался и оно больше покрывало торец и боковую поверхность положительного угля. При силе тока в 80 А (начало развития эффекта высокой интенсивности в нашем опыте) отрицательное пламя покрывало всю торцевую часть положительного угля. При этом обнаружилось слабо выраженное положительное пламя. При силе тока дуги 90—100 А явление протекало различно.

В одном случае положительное пламя выявлялось более отчетливо и, как бы оказывая давление на отрицательное пламя, отодвигало его в направлении к катоду. При этом нарушался контакт отрицательного пламени с нижней частью анода и появлялся кратер небольшой глубины. Характеристические кривые дуги показывали плавно возрастающий ход.

В другом случае отрицательное пламя, увеличивая свое давление на анод, вновь достигало непосредственного контакта с анодом по всей его торцевой и частично по боковой поверхности (пунктирная граница на рис. 1). Ранее образовавшийся кратер исчезал, напряжение дуги уменьшалось. Характеристические кривые показывали излом.

При дальнейшем увеличении силы тока (например, при $i = 150$ А, рис. 1) непосредственный контакт отрицательного пламени с анодом нарушался и наблюдались отчетливо выраженные положительное и отрицательное пламена. При токе, соответствующем перегруженной дуге, хорошее

строение пламени наблюдалось лишь в отдельные кратковременные моменты. В остальное же время пламя дуги имело вид, представление о котором дает схематическая зарисовка на рис. 1 для $i = 200$ А.

Особенность строения пламени дуги при низко расположенном катоде и короткой дуге состоит в том, что в этом случае при неразвитом эффекте высокой интенсивности отрицательное пламя окутывает конец положительного угля на сравнительно большой длине (10—20 мм).

Наблюдения за анодом дуги показали, что его диаметр значительно отличается от диаметра негоревшего положительного угля и бывает минимальным при наименьшей силе тока дуги.

В табл. 2 даны величины диаметра анода и глубины кратера, измеренные в опыте, результаты которого были ранее представлены (рис. 2 [Л. 3]).

Таблица 2

Сила тока дуги, А	70	90	110	130	150	160	180	200	250
Диаметр анода, мм	9,8	11,1	11,4	13,0	13,8	13,9	13,0	12,9	13,0
Глубина кратера, мм	0	1,0	4,0	8,0	9,8	10	10	10,2	8,5

Достоин внимания факт, что рост диаметра анода с увеличением силы тока дуги совершается не монотонно. Момент внезапного уменьшения диаметра анода наблюдается при токе, соответствующем верхней границе второго участка характеристических кривых дуги.

О роли кратера в явлении эффекта высокой интенсивности. Описанные выше исследования показали, что развитие эффекта высокой интенсивности сопровождается образованием и развитием кратера. Образование кратера нужно признать важным моментом в явлении эффекта высокой интенсивности. С другой стороны, такие факты, как достижение предельной глубины кратера раньше, нежели закончится развитие эффекта высокой интенсивности, получение в некоторых случаях повышенных значений яркости кратера и расхода анода при меньшей глубине кратера и др., показывают, что образованием кратера не исчерпывается сущность эффекта высокой интенсивности.

В свете поставленного вопроса представляется интерес характеристические кривые дуги, снятые нами при разных значениях вылета конца положительного угля из радиатора дуговой лампы.

На рис. 2 даны характеристические кривые дуги с 11-мм опытными углями, снятые при двух значениях вылета ($s = 30$ и 10 мм) и при одинаковых остальных условиях работы углей в дуговой лампе.

Кривые показывают, что уменьшение вылета положительного угля из радиатора лампы с 30 до 10 мм практически не сказалось на изменении глубины кратера, в то время как другие характеристики горения дуги изменились. Уменьшение вылета привело к увеличению диаметра анода D при одновременном снижении величин яркости кратера B , напряжения дуги U и расхода анода v . Этот результат, в свою очередь, подтверждает мнение о том, что явление эффекта высокой интенсивности

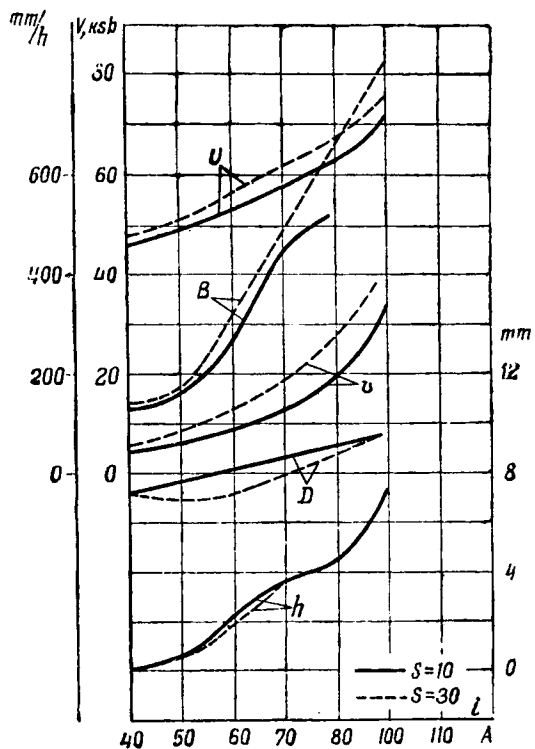


Рис. 2.

нельзя ставить в зависимость только от образования кратера.

Весьма интересны результаты, полученные при исследовании опытных образцов 11-мм углей, различающихся лишь содержанием редких земель в фитиле (образцы I с содержанием 10% и образцы II — с содержанием 70%).

При малых силах тока дуги эффект высокой интенсивности развит в большей степени при углях с малым содержанием редких земель в фитиле [кривые $h(i), U(i), B(i)$ и $v(i)$ рис. 3]. При дальнейшем увеличении силы тока глубина кратера углей I продолжает оставаться значительно большей, нежели углей II . Однако темп развития эффекта высокой интенсивности получается (рис. 3) значительно более высоким при углях II .

Развитие эффекта при углях II заканчивается при токе около 120 А. У дуги с углями I рост глубины кратера продолжается до силы тока в 150 А и глубина кратера достигает исключительно большой величины в 14 мм. При силе тока дуги $i > 150$ А глубина кратера быстро уменьшается. Однако развитие эффекта высокой интенсивности продолжается до значения тока 200 А. Следовательно, темп и уровень развития эффекта высокой интенсивности не связаны однозначно с темпом и уровнем развития кратера.

Полученные результаты наряду с описанными ранее дают материал для суждения о причинах и механизме образования кратера у дуги высокой интенсивности.

Причины и механизм образования кратера. При работе положительного угля в дуговой лампе имеют место два вида его расхода: а) на торцевой ча-

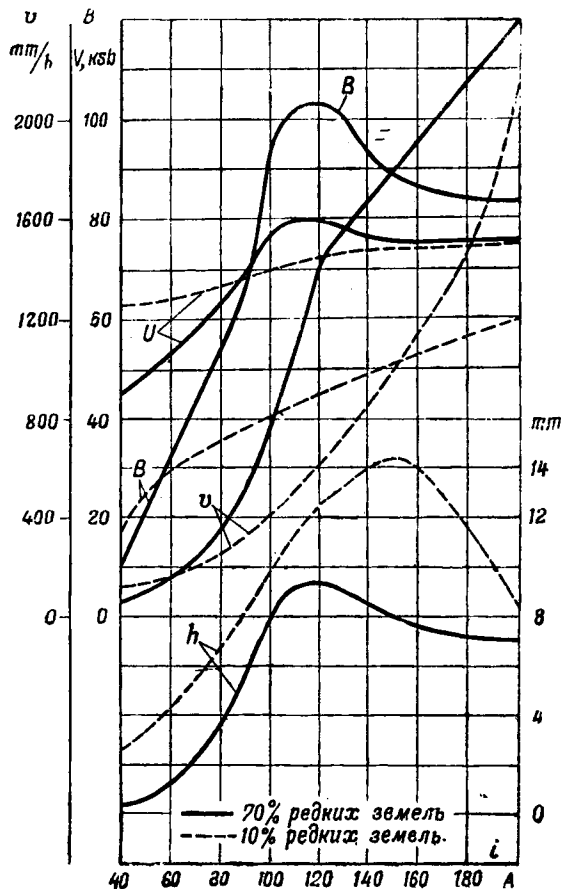


Рис. 3.

сти конца угля и б) на боковой цилиндрической поверхности.

Не рассматривая вопроса о том, какие химические и физические процессы обуславливают каждый из указанных видов расхода угля, мы из соображений удобства изложения примем условно, что составляющая a определяется испарением угля, составляющая b — сгоранием.

Скорость «испарения» угля возрастает вместе с увеличением силы тока дуги. На скорости «сгорания» сказываются, кроме силы тока, длина концевой части угля и расход угля в единицу времени, так как расход определяет время пребывания концевой части угля в зоне сгорания.

В начальный момент работы негоревшего ранее экземпляра угля при малой силе тока дуги имеем относительно толстые стенки оболочки на торцевой части угля. Анодное пятно при этом покрывает торец фитиля и лишь верхнюю часть оболочки. Благодаря этому при вращении угля средняя температура на торцевой части фитиля должна быть выше, чем на торцевой части стенок оболочки. Это обстоятельство вместе с повышенной летучестью материала фитиля обуславливает углубление анода по фитилю, т. е. образование кратера.

При дальнейшем горении дуги с той же малой силой тока конец угля, медленно испаряясь с торца, будет сгорать с боковой поверхности, в результате чего толщина стенок кратера сильно уменьшится. При вращении угля тонкие стенки кратера

будут испаряться в зоне анодного пятна быстрее, нежели фитиль угля. В результате этого имевшееся ранее углубление по фитилю пропадает. В зависимости от соотношения скорости испарения тонких стенок оболочки и скорости испарения фитиля анод может получиться выпуклым в той или иной степени или плоским.

При углях разных типов степень выпуклости должна быть различна, так как толщина стенок углей разных типов обычно не бывает одинаковой (сохраняется приблизительно одинаковым отношение $\frac{d_{\text{ф}}}{d}$). К увеличению выпуклости анода должно

приводить пониженное расположение катода, так как при этом отрицательное пламя снижается и в большей мере окутывает конец положительного угля, увеличивая сгорание оболочки.

По мере увеличения тока возрастает расход угля. Одновременно происходит изменение доли составляющих расхода оболочки угля, а именно: доля испарения в общем расходе оболочки растет, а доля сгорания одновременно с ростом общего расхода угля уменьшается. Замедление сгорания оболочки (с боковой поверхности) при одновременном росте испарения (с торца) приводит к ее утолщению на краю угля, т. е. к утолщению стенок кратера. Расход (испарение) фитиля угля растет вместе с увеличением силы тока дуги.

Таким образом получаем, что при увеличении тока рост линейного расхода оболочки угля (происходит за счет роста испарения) ограничивается утолщением ее краев, в то время как рост расхода фитиля такого ограничения не имеет. Благодаря этому в начальный момент горения дуги при увеличенной силе тока относительный линейный расход оболочки угля (по отношению к расходу фитиля) уменьшается, и при некоторой силе тока кратер может образоваться при условии, что летучесть фитиля выше летучести оболочки.

Из изложенного видно, что необходимым условием для образования кратера является соответствующая толщина стенок оболочки на краю угля. Следует, однако, подчеркнуть, что одного этого условия недостаточно. Вторым условием является получение определенной величины плотности тока на аноде, обеспечивающей необходимый линейный расход угля. Эти соображения о необходимости двух условий можно подтвердить следующими экспериментами.

В опыте с углями типа 18-250 развитие кратера началось при силе тока дуги в 190 А, при этом образовывался кратер глубиной около 6 мм (рис. 10) [Л. 3]. Вставляя в лампу новый экземпляр положительного угля и начиная работу с ним в дуге с силы тока в 190 А, мы получали, что при этом токе кратер не выгорал в течение около 20 мин. Лишь по истечении указанного времени, когда благодаря обгоранию угля с боковой поверхности его диаметр на конце значительно уменьшался (при этом стенки оболочки становились тоньше, а плотность тока на аноде больше), выгорал кратер нормальной для данной силы тока глубины.

Можно сказать, что в этом случае при новом экземпляре положительного угля толщина стенок

оболочки вначале была больше минимально необходимой, однако плотность тока на аноде при этом получалась недостаточной, и кратер не выгорал.

В другом эксперименте мы стачивали на конус конец угля; при этом толщина стенки сточенной оболочки получалась небольшой. При горении дуги с номинальной силой тока образование кратера задерживалось до тех пор, пока сточенный конец угля сгорал, и оболочка на краю угля приобретала достаточную толщину. В этом случае, очевидно, задержка выгорания кратера объясняется малой толщиной стенки оболочки при достаточной плотности тока на аноде. Нетрудно объяснить и нестационарное горение дуги в начальный период работы нового экземпляра угля при номинальной силе тока.

В этом случае вначале горения дуги толщина стенки оболочки на необгоревшем конце угля была относительно большая, а плотность тока получается уменьшенной, благодаря чему снижаются расход угля и яркость кратера. Напряжение дуги бывает пониженным, в силу чего длина дуги с помощью автомата лампы, установленного на $U = \text{const}$, увеличивается. Увеличенная толщина стенки оболочки и увеличенная длина дуги обеспечивают и при уменьшенной плотности тока повышенную глубину кратера. При дальнейшем горении дуги толщина стенки кратера уменьшается благодаря обгоранию оболочки с боковой поверхности. В силу этого уменьшается глубина кратера. В то же время при уменьшенном диаметре конца угля увеличивается плотность тока на аноде, а это приводит к росту яркости и расхода угля.

Продолжительность нестационарного горения дуги зависит от конструкции дуговой лампы, потому что длина зоны сгорания угля у ламп разных конструкций различна.

Запоздалое развитие кратера при низко расположенном катоде и малой длине дуги объясняется: а) усиленным обгоранием оболочки с боковой поверхности (уменьшением ее толщины) благодаря окутыванию конца угля отрицательным пламенем; б) уменьшением плотности тока на аноде благодаря соприкосновению отрицательного пламени с анодом по большей площади.

Уменьшение вылета положительного угля из радиатора лампы приводит к увеличению диаметра анода вследствие уменьшения длины зоны сгорания. На глубину кратера при этом оказывают действие две противоположные причины: 1) уменьшение плотности тока на аноде и 2) увеличение толщины стенки оболочки угля. Результирующее действие указанных причин получается практически равным нулю. В то же время уменьшение плотности тока на аноде приводит к уменьшению напряжения дуги, яркости кратера и расхода угля.

Причины немонотонного хода кривой диаметра анода $D(i)$ и причины особенностей развития кратера у углей с малым и большим содержанием редких земель в фитиле будут выяснены ниже.

2. Сущность эффекта высокой интенсивности. Изложенные ранее сведения о процессе развития эффекта высокой интенсивности [Л. 3] и данные этой статьи о механизме образования кратера при учете результатов большого числа опытов с углями различного состава и разных размеров позволяют нам

сформулировать положения о сущности эффекта высокой интенсивности.

Общая схема процесса развития эффекта высокой интенсивности. Наличие в составе фитиля положительного угля редких земель и лантана, имеющих сравнительно низкий потенциал ионизации (углерод 11,2; церий 6,9; лантан 5,5), обуславливает уменьшенное напряжение дуги (по сравнению с напряжением простой угольной дуги) при малых силах тока, когда кратер образоваться не может. Образованию кратера при этом препятствует сильное обгорание оболочки с боковой поверхности, уменьшающее ее толщину. Пока кратера нет, увеличение силы тока дуги будет сопровождаться увеличением активной площади анода, так как давление отрицательного пламени на анод растет вместе с током. Благодаря увеличению площади анода плотность тока на нем может уменьшаться, несмотря на рост силы тока дуги. Поскольку падение напряжения в пламени и на катоде дуги мало зависит от силы тока, то напряжение дуги в таких случаях может уменьшаться.

По мере увеличения силы тока дуги и роста расхода анода улучшаются условия для образования кратера.

Как только кратер образуется, получается канал, наполненный парами фитиля. Электрическая проводимость этого канала больше проводимости пространства у анода в случае отсутствия кратера. В результате этого разряд в той или иной мере отшнуровывается в кратер, и плотность тока в последнем увеличивается. При этом изменяется структура пламени дуги, поскольку отрицательные ионы начинают проходить главным образом через хорошо проводящий канал-кратер и меньше попадают на оболочку положительного угля с внешней стороны. Распространение отрицательного пламени по оболочке положительного угля уменьшается (или прекращается), и пламя несколько отодвигается от анода в направлении к катоду.

Значительное увеличение плотности тока в кратере может иметь место лишь при большой концентрации в нем веществ с малым потенциалом ионизации, т. е. при определенном составе фитиля.

Увеличение силы тока дуги после образования кратера приводит к увеличению плотности тока в нем, вследствие чего увеличивается напряжение дуги. Если проводимость кратера относительно велика и через него проходит основная часть тока, то рост напряжения дуги будет вызываться не только ростом плотности тока, но и увеличением эффективной длины разряда за счет возрастания глубины кратера.

Рост плотности тока в кратере вызывает свечение с большой яркостью заключенных в нем паров положительного угля. Рост мощности, затраченной в кратере, приводит к увеличению расхода угля и увеличению глубины кратера. При достаточно большой силе тока дуги прохождение тока через кратер приводит к такому падению напряжения в нем, при котором общее напряжение дуги оказывается больше напряжения, необходимого для разряда через оболочку положительного угля (простая дуга). В таком случае разряд стремится к переходу из кратера на стенки оболочки поло-

жительного угля. При достижении определенной величины напряжения дуги происходит перебрасывание разряда из кратера на оболочку положительного угля с торцевой и боковой сторон. Это перебрасывание разряда на оболочку угля вызывает уменьшение плотности тока в кратере, благодаря чему падение напряжения в нем уменьшается, и разряд перебрасывается с оболочки обратно в кратер. Затем явление перебрасывания разряда повторяется. Оно обуславливает трещание и скрипы дуги.

Переход разряда на оболочку приводит к большому обгоранию ее с внешней стороны. Это является причиной нарушения монотонности хода кривой изменения диаметра анода в зависимости от силы тока дуги $L(i)$.

Явление перебрасывания разряда сопровождается увеличением расхода оболочки и уменьшением расхода фитиля, а следовательно, и уменьшением глубины кратера.

После перебрасывания разряда на оболочку он может частично распространяться по ней при последующем увеличении силы тока дуги, а также может увеличивать свое сечение перед анодом. Благодаря этому изменение величин плотности тока и глубины кратера, а следовательно, и напряжения дуги может быть более медленным, или эти величины могут оставаться практически неизменными. Трещание и скрипы дуги в таких случаях имеют более высокий тон. Это происходит потому, что разряд перебрасывается при этом не столько из кратера на оболочку и обратно, сколько с одних частей оболочки на ее соседние части; этот вторичный эффект совершается с большей частотой.

Вольтамперная кривая дуга $U(i)$. Указанный выше рост давления отрицательного пламени на анод при малых силах тока имеет важное значение для уменьшения напряжения дуги не столько потому, что увеличивается площадь анода, сколько потому, что он приводит к исчезновению расположенного около анода узкого перешейка пламени, в котором плотность тока и падение напряжения бывают сравнительно велики. В таких случаях на кривой $U(i)$ имеется падающий участок (рис. 2 [Л. 3]).

Когда отрицательное пламя достигает боковой поверхности оболочки положительного угля при начальных значениях тока дуги (короткая дуга, низкое расположение отрицательного угля), т. е. если узкий перешеек пламени около анода отсутствует, то последующее ограниченное увеличение тока (до образования кратера) не может существенно изменить структуру пламени дуги. Увеличение силы тока дуги при этом может компенсироваться увеличением площади анода так, что плотность тока на аноде и напряжение дуги будут оставаться практически неизменными. В таком случае кривая $U(i)$ не будет иметь падающего участка (рис. 4 [Л. 3]).

Могут быть случаи, когда отрицательное пламя дуги, не достигая оболочки положительного угля при начальном значении силы тока, не достигает ее и при последующем ограниченном увеличении тока дуги (длинная дуга, высокое расположение отрицательного угля). Структура пламени дуги при этом остается в основном неизменной. Увеличение

тока в таких случаях приводит к увеличению плотности тока на аноде, глубины кратера и напряжения дуги. Вольтамперная кривая дуги имеет только возрастающий ход. В наших экспериментах такие случаи наблюдались при относительно высоком расположении отрицательного угла ($y = 0$), а также при большом угле наклона оси отрицательного угла к горизонту ($\beta = 75^\circ$).

Образование кратера, как это было выяснено выше, обуславливает рост напряжения дуги. Кривая $U(i)$ приобретает возрастающий характер. Следует заметить, что в смысле увеличения напряжения дуги прирост глубины кратера не эквивалентен увеличению длины дуги, так как плотность тока в кратере обычно значительно выше, чем в любом другом месте пламени дуги. Например, согласно рис. 3 при увеличении силы тока от 40 до 110 А прирост h (сплошная кривая) на 9 мм дает увеличение U на 35 В, т. е. 3,9 В/мм, в то время как средний градиент потенциала в пламени составляет меньше 2 В/мм.

Если проводимость кратера не получается достаточно большой (например, благодаря малой концентрации паров редких земель), то разряд отщипывается слабо. Отрицательное пламя в таких случаях и при большом токе непосредственно соприкасается с положительным углем и распространяется по его оболочке. Увеличение глубины кратера при этом лишь в малой степени влияет на рост напряжения дуги. Например, при углях с 10-процентным содержанием редких земель, согласно пунктирным кривым рис. 3 прирост h на 11 мм при увеличении силы тока дуги от 40 до 150 А приводит к увеличению U на 11 В, т. е. средний градиент потенциала в кратере составляет лишь 1 В/мм.

При перебрасывании разряда на оболочку положительного угла и обратно в кратер напряжение дуги будет колебаться около некоторой величины U_{\max} , которая получается больше напряжения простой дуги U_c при равной длине дуги. Это объясняется тем, что благодаря наличию кратера эффективная длина дуги высокой интенсивности будет больше.

Расход анода $v(i)$. Расход анода является в основном функцией мощности, выделенной на аноде дуги. Отщипывание разряда способствует увеличению плотности тока на аноде, благодаря чему мощность анода растет быстрее, нежели общая мощность дуги.

Падающему участку кривой $U(i)$ соответствует уменьшающаяся плотность тока на аноде, благодаря чему кривая $v(i)$ имеет лишь слабый (обычно по закону, близкому к линейному) подъем, обусловленный ростом общей мощности дуги. После образования кратера, благодаря отщипыванию в нем разряда, затрачиваемая на аноде мощность при увеличении силы тока дуги растет быстрее, нежели общая мощность дуги. Кривая $v(i)$ идет круче, и рост ее часто совершается по закону выше линейного.

При короткой дуге и при низко расположенном катоде образование на аноде кратера и отщипывание в нем разряда происходят на протяжении узкого интервала изменения тока дуги (скачкооб-

разно), поэтому крутизна кривой $v(i)$ на этом участке изменяется сильно. В таких случаях при дальнейшем увеличении тока расход анода часто растет по линейному закону (например, рис. 10 [Л. 3]). Объяснить это можно тем, что здесь в период скачкообразного развития кратера происходит полное отщипывание разряда, в то время как кратер не выгорает до предельно возможной глубины. Поэтому при дальнейшем увеличении тока плотность тока в кратере растет только пропорционально силе тока, а рост удельной мощности на аноде задерживается благодаря увеличению глубины кратера. Относительно быстрое отщипывание разряда по сравнению со скоростью выгорания кратера объясняется благоприятными условиями для отщипывания—короткая дуга, низкое расположение отрицательного пламени—и неблагоприятными условиями для выгорания кратера—обгорание оболочки благодаря окутыванию ее отрицательным пламенем.

Отсюда необходимо сделать важный вывод—нелинейный ход кривой $v(i)$ является показателем продолжающегося отщипывания разряда.

Момент предельного для данного случая отщипывания разряда не обязательно должен совпадать с моментом достижения предельной глубины кратера. Следовательно, соответствующий максимум кривой $h(i)$ не обязательно должен совпадать с током точки перехода кривой $v(i)$ от нелинейного закона к линейному (рис. 8 [Л. 3]). Отсюда становится понятным, что каждая из кривых $h(i)$ и $v(i)$ в отдельности не всегда может дать правильное представление о конце развития эффекта высокой интенсивности.

После перебрасывания разряда из кратера на оболочку положительного угла увеличивается действующая площадь анода, и рост плотности тока замедляется. Вследствие этого расход анода при дальнейшем увеличении силы тока дуги совершается по линейному закону; крутизна кривой получается меньше крутизны, достигнутой при предельном отщипывании разряда.

Глубина кратера. С образованием кратера улучшаются условия для увеличения его глубины: частичное отщипывание разряда сопровождается: 1) возрастанием расхода анода и 2) таким изменением структуры пламени, при которой боковая поверхность положительного угла обгорает меньше. Оба эти фактора способствуют увеличению толщины стенки оболочки на краю кратера.

Равновесие в расходе фитиля и оболочки угля при данной силе тока дуги, т. е. сохранение постоянной глубины кратера, достигается следующим образом.

При возрастании глубины кратера увеличивает площадь внутренней поверхности оболочки, на которой может выделяться мощность, затрачиваемая в кратере. Это приводит к уменьшению доли мощности, выделяемой на фитиле (дно кратера), и к сравнительному уменьшению расхода фитиля. Указанная причина действует лишь в период увеличения глубины кратера. После известного возрастания глубины равновесие между расходом фитиля и оболочки угля устанавливается такое, какое

соответствует постоянной глубине кратера при данном режиме горения дуги.

При относительно высоком расположении катода выгорание кратера по мере увеличения силы тока дуги получается плавным (рис. 2 [Л. 3]). Объясняется это тем, что при достаточно высоком расположении отрицательного пламени по отношению к аноду оно не касается нижних торцевых частей оболочки положительного угля; при этом средняя температура торца оболочки вращающегося угля бывает значительно ниже температуры торца фитиля, благодаря чему выгорание кратера облегчается. В таких случаях кратер начинает выгорать раньше, но процесс выгорания с увеличением тока протекает сравнительно медленно и плавно, так как действует лишь один фактор — утолщение стенки оболочки вследствие уменьшенного обгорания ее при увеличении расхода анода.

В случае низкого расположения катода выгорание кратера с увеличением тока задерживается до определенного момента, а затем совершается скачкообразно (см., например, рис. 4 [Л. 3]). Объяснить это можно тем, что низко расположенное отрицательное пламя соприкасается с оболочкой положительного угля по всей торцевой поверхности ее и окутывает боковую поверхность оболочки на некоторую длину. Благодаря этому температура торца оболочки мало отличается от температуры торца фитиля, кроме того, оболочка, окутываемая отрицательным пламенем, сильно обгорает с наружной поверхности и ее толщина на краю кратера уменьшается. В таких случаях кратер начинает выгорать при большей силе тока дуги. После начала выгорания кратера и по мере отщурования в нем разряда отрицательное пламя перестает окутывать оболочку с внешней стороны и перестает касаться нижней части торца оболочки. В результате средняя температура торца оболочки вращающегося угля при этом будет уменьшаться, а толщина стенки оболочки, как это было выяснено выше, будет увеличиваться. Вследствие этого процесс выгорания кратера совершается скачкообразно.

Достижение предельной для данных углей глубины кратера при увеличении силы тока дуги может быть обусловлено двумя причинами.

Одной из этих причин является достижение предельного падения потенциала в кратере, благодаря чему разряд перебросится из кратера на оболочку и глубина кратера уменьшится или перестанет возрастать. Во всех случаях, когда предельная глубина кратера ограничивается перебрасыванием разряда на оболочку по причине большого падения потенциала в кратере, отщурование разряда должно закончиться раньше или одновременно с достижением предельной глубины кратера, но не позднее.

Моменту прекращения отщурования разряда в кратере соответствует изменение хода кривой $v(i)$ с нелинейного на линейный, поэтому кривые $v(i)$ и $h(i)$ позволяют установить, обусловливается ли предельная глубина кратера указанной причиной.

Все приведенные ранее [Л. 3] характеристические кривые дуги, кроме кривых рис. 3, дают основание считать, что именно большое падение по-

тenciала в кратере анода было причиной, обусловившей достижение предельной глубины кратера.

Пунктирные кривые на рис. 3, снятые при углах с 10-процентным содержанием редких земель в составе фитиля, отличаются тем, что в этом случае уменьшение глубины кратера согласно кривой $h(i)$ начинается раньше, нежели кривая $v(i)$ прекратит нелинейный ход. Таким образом уменьшение глубины кратера в этом случае при токе дуги больше 150 А не связано, очевидно, с достижением предельного падения потенциала в кратере. Разряд при этом продолжает отщуровываться, на что указывают нелинейный ход кривой $v(i)$ и возрастающий ход кривой $U(i)$.

Причиной достижения предельной глубины кратера в этом случае, надо полагать, является сильное выгорание краев сравнительно нетолстой оболочки положительного угля изнутри кратера, которое получается благодаря большой затрате мощности в кратере при больших силах тока дуги.

Мы можем сказать, что если при малом токе дуги начало выгорания кратера на аноде задерживается благодаря обгоранию оболочки положительного угля снаружи, то при большом токе рост глубины кратера с увеличением силы тока дуги может прекратиться благодаря выгоранию оболочки изнутри кратера.

Стильбоамперная кривая кратера дуги $B(i)$. При малом токе дуги, когда кратера нет, а расход угля мал, свечение анода определяется почти исключительно температурным излучением его торцевой поверхности. Присутствие редких земель в фитиле угля облегчает условия ионизации, что приводит к снижению температуры анодного пятна. В силу этого яркость анода бывает меньше 16 ksb, что присуще чистому углероду при температуре его испарения.

При возрастании тока в пределах падающего участка вольтамперной кривой яркость анода может оставаться неизменной или даже уменьшаться, если нет достаточного роста расхода анода. При увеличении тока в пределах возрастающего участка вольтамперной кривой яркость анода растет как за счет роста плотности тока, так и за счет увеличения числа светящихся частиц редких земель, концентрация которых в парах у анода возрастает. При увеличении глубины кратера яркость растет, кроме того, и за счет увеличения толщины излучающего слоя.

Кратер просматривается через толщу пламени в дуговом промежутке, поэтому его яркость будет зависеть от коэффициента пропускания пламени. При некоторых условиях горения дуги (большое содержание редких земель в фитиле, короткая дуга и др.) сильно увеличивается поглощение света во внешних частях пламени («желтая дымка»), очевидно в связи с образованием молекул C_2 . В таких случаях видимая яркость кратера уменьшается, несмотря на рост плотности тока, глубины кратера и концентрации паров редких земель.

При предельном увеличении напряжения дуги и глубины кратера, когда разряд начнет перебрасываться на оболочку положительного угля, плотность тока в кратере будет резко изменяться, благодаря чему получатся резкие колебания его яркости. При

дальнейшем увеличении силы тока дуги на яркость кратера также окажет действие изменение его глубины и структуры пламени, приводящее к изменению толщи паров перед анодом.

Определение сущности эффекта высокой интенсивности. Из приведенного описания общей схемы процесса развития эффекта высокой интенсивности и объяснения основных характеристических кривых дуги следует заключить, что обычно существование названного эффекта в угольной дуге бывает связано: 1) с выгоранием кратера, в углублении которого концентрируются пары веществ, содержащихся в фитиле положительного угля с относительно низким потенциалом ионизации; 2) с отщуриванием разряда в степени, зависящей от проводимости кратера и проводимости стенок оболочки, а также от расположения отрицательного пламени по отношению к аноду (влияние высоты и угла наклона отрицательного угля, длины дуги, содержания редких земель в фитиле).

Указанные факторы в известной мере независимы, и взаимодействие их может быть различно.

Возможно некоторое развитие эффекта высокой интенсивности под действием только одного из этих факторов. В качестве примера можно указать на развитие этого эффекта у простой угольной дуги (отщуривание разряда без выгорания кратера) или же на развитие его на первом участке характеристических кривых [Л. 3] при короткой дуге высокой интенсивности (выгорание кратера без отщуривания разряда).

При некоторых условиях горения дуги разряд бывает отщуриван в кратере полностью при небольшой его глубине. Дальнейшее увеличение тока дуги приводит к большему развитию эффекта высо-

кой интенсивности за счет роста глубины кратера и за счет роста плотности тока вследствие увеличения силы тока дуги без отщуривания разряда. При благоприятных условиях выгорание кратера достигает своей предельной величины при сравнительно малой силе тока. Последующее увеличение тока приводит к дальнейшему развитию эффекта высокой интенсивности вследствие роста плотности тока на аноде как за счет увеличения силы тока дуги, так и за счет продолжающегося отщуривания разряда. Возможны случаи, когда кратер достигнет предельной (в данном случае небольшой) глубины и разряд в нем будет полностью отщуриван, но напряжение дуги не будет достаточным для перебрасывания разряда на оболочку. Дальнейшее увеличение силы тока дуги приведет к последующему развитию эффекта высокой интенсивности (рост яркости кратера и напряжения дуги) вследствие роста плотности тока в кратере, обусловленного только увеличением тока.

Формулируя сущность эффекта высокой интенсивности в угольной дуге, мы можем сказать, что принципиально это явление представляет собой достижение сравнительно большой фактической плотности тока на аноде дуги. Рост фактической плотности тока на аноде характеризуется возрастающим ходом вольтамперной кривой $v(i)$ дуги.

С практической точки зрения в явлении эффекта высокой интенсивности имеет существенное значение и образование кратера на аноде дуги.

Литература

1. Н. Векс. ETZ, Н. 36, 1921.
2. В. А. Кизель. ЖТФ, т. X, вып. 10, 1940.
3. Н. А. Карякин. Электричество, № 8 и № 11, 1945.



Электрическое моделирование физических процессов при помощи матричных схем с усилителями

Проф. Л. И. ГУТЕНМАХЕР, доц. И. С. ГРАДШТЕЙН, инж. В. А. ТАФТ

Энергетический институт им. Кржижановского Академии наук СССР

Одной из основных задач технических наук является разработка эффективных скоростных методов исследования динамических процессов в различного рода сооружениях, машинах, автоматических устройствах и системах из них. Математически эта задача часто сводится к решению систем обыкновенных дифференциальных уравнений. В большом числе случаев на основе метода исследования малых колебаний системы (Лагранж, Ляпунов) можно привести эту задачу к системам линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Однако, как только число уравнений становится большим трех, так возникает необходимость выполнения весьма трудоемкой вычислительной работы, даже при решении си-

В статье даны результаты исследования матричных схем с учетом собственных параметров усилителей. Показано, что путем простого преобразования заданных уравнений можно практически устранить влияние малых «паразитных» параметров усилителей и получить при помощи этих схем приближенное решение заданной системы линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами.

стемы линейных уравнений. В связи с этим инженеры редко пользуются численными методами анализа в указанных вопросах.

Большую пользу могут оказать здесь электрические модели, которые позволяют быстро решать такие задачи. Эти модели могут сыграть в этом деле роль логарифмических линеек. Подобно тому, как наличие арифмометров ни в какой мере не уменьшает значение и необходимость линеек в инженерной практике, так и математические машины (перфорационные, счетно-импульсные, интеграторы системы Буша и др.) не могут уменьшить актуальность таких электрических моделей при исследованиях динамических процессов и расчете параметров таких систем.

В работах [Л. 1—5] мы показали возможность применения для этих целей электрических схем с электронно-ламповыми усилителями. В настоящей работе приведены результаты развития теории таких «матричных схем» с учетом собственных параметров усилителей и рассматриваются дальнейшие задачи в развитии и применении этих схем.

На рис. 1 представлена «матричная схема». Распределение напряжения во входных цепях усилителей описывается следующей системой уравнений:

$$A''_k U_k = \sum_{i=1}^n A_{ik} (N a_{ik} U_i - U_k) + A'_k (E_k - U_k) \quad (k=1, 2, \dots, n). \quad (1)$$

Рассмотрим частный случай, когда элементы схемы A представляют собой активные сопротивления и емкости (рис. 2).

В соответствии с этим для переходного процесса все A мы заменим суммами $g + cp$ с соответствующими индексами. Кроме того, для сокращения введем обозначения:

$$\sum_{i=1}^n g_{ik} + g'_k + g''_k = g_k \quad \text{и} \quad \sum_{i=1}^n c_{ik} + c'_k + c''_k = c_k \quad (k=1, 2, \dots, n). \quad (2)$$

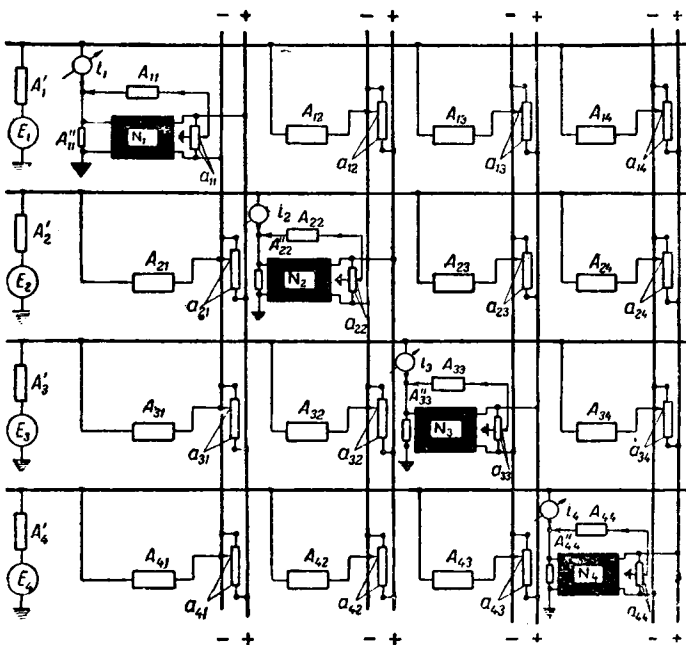


Рис. 1 Матричная схема.

E_1, E_2, \dots, E_n — источники; A'_1, A'_2, \dots, A'_n — проводимости, включенные последовательно с источниками ($A'_k E_k$ — правые части уравнений); N — коэффициент усиления; A_{ik} — проводимости, связывающие k -й усилитель с i -й линией; A_{kk} — проводимость, соединяющая выход k -го усилителя с его входом. A''_{kk} — проводимость на входе усилителя.

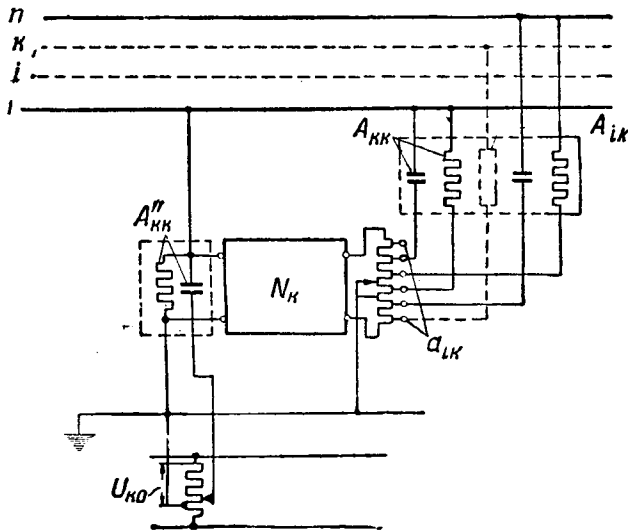


Рис. 2. Элемент матричной схемы со связями, состоящими из активных проводимостей и емкостей.

Тогда переходные процессы в матричной схеме будут описываться системой уравнений:

$$\sum_{i=1}^n a_{ik} (g_{ik} + C_{ik} p) N U_k - (g_k + C_k p) U_k + (g'_k + C'_k p) E_k = 0 \quad (3)$$

($k=1, 2, \dots, n$).

Принцип применения этих схем для приближенного решения заданной системы уравнений при определенных начальных условиях изложен в работе [Л. 4]. Для простоты изложения, чтобы не затемнять общие принципы, там было принято, что коэффициент усиления является величиной постоянной ($N = \text{const}$). В действительности коэффициент усиления за счет собственных параметров усилителя является некоторой функцией оператора $p = \frac{d}{dt}$.

Таким образом, в результате действия собственных параметров усилителя система уравнений, описывающая в действительности переходный процесс в матричной схеме, будет уже не система (3), которая соответствовала решаемой системе уравнений, а другая система уравнений, более высокого порядка.

В связи с этим возникает вопрос, может ли матричная схема дать правильное решение заданной системы уравнений.

Оказывается, что решение всегда может быть получено при следующих условиях: 1) решаемая система уравнений приведена к такому виду, когда матрица коэффициентов при производных — треугольная, т. е. все элементы этой матрицы, лежащие над (или под) главной диагональю матрицы, равны нулю; 2) операторное выра-

жение для коэффициента усиления¹ имеет некоторый вполне определенный вид, например,

$$N(p) = \frac{S_1(\varepsilon p)}{S_2(\varepsilon p)} = \frac{\gamma(\beta_1 \varepsilon p + 1)}{\beta_2 \varepsilon p + 1}, \quad (4)$$

где ε — величина малая; β_1, β_2, γ — величины конечные; 3) если работа отдельных усилителей устойчива.

Первое условие всегда может быть выполнено путем несложных преобразований [Л. 6]. Второе условие, как это будет ниже показано, для обычного соотношения параметров усилителя всегда имеет место или во всяком случае всегда может быть достигнуто конструктивным выбором схемы усилителя.

При этих условиях дополнительные корни, обусловленные собственными параметрами усилителей, не внесут неустойчивости и, более того, решение получающейся действительной системы уравнений будет весьма близко к решению заданной системы уравнений.

Перейдем к рассмотрению вопроса. Найдем сначала выражение для коэффициента усиления однокаскадного² реостатного усилителя (рис. 3). Схема замещения однокаскадного реостатного усилителя показана на рис. 4.

Для точки А схемы рис. 4 согласно первому закону Кирхгофа будем иметь:

$$I_3 = I_{a1} + I_{a2} + I_{a3} \quad (5)$$

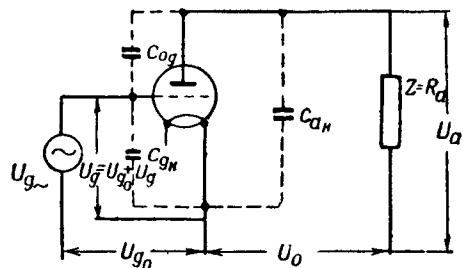


Рис. 3. Принципиальная схема однокаскадного усилителя.

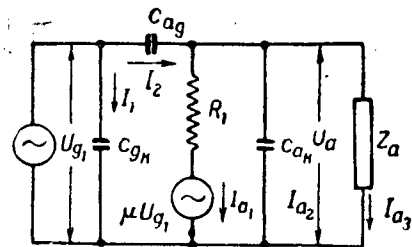


Рис. 4. Эквивалентная схема однокаскадного усилителя.

¹ В дальнейшем мы численное значение коэффициента усиления будем обозначать буквой γ , а под буквой N понимать операторную функцию вида (4).

² Вопрос применения многокаскадных усилителей в этих схемах явится предметом отдельной работы.

Подставляем

$$I_3 = C_{ag} p (U_g + U_a); I_{a1} = -(U_a - \mu U_g) \frac{1}{R_i};$$

$$I_{a2} = -C_{ak} p U_a.$$

$$I_{a3} = \frac{-U_a}{R_a}. \quad (6)$$

Получим

$$N = \frac{U_a}{U_g} = \frac{-C_{ag} p + \frac{\mu}{R_i}}{(C_{ak} + C_{ag}) p + \left(\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_i}\right)}. \quad (7)$$

Уравнение (7) можно переписать так:

$$N = \left(\frac{\mu R_a}{R_i + R_a}\right) \frac{-\frac{1}{\mu} C_{ag} R_i p + 1}{\left(\frac{R_a}{R_a + R_i}\right) \left(1 + \frac{C_{ak}}{C_{ag}}\right) (C_{ag} R_i p + 1)}. \quad (8)$$

Введем обозначения:

$$\nu = \frac{\mu R_a}{R_i + R_a}; \quad \beta_1 = -\frac{1}{\mu};$$

$$\beta_2 = \left(\frac{R_a}{R_a + R_i}\right) \left(1 + \frac{C_{ak}}{C_{ag}}\right). \quad (9)$$

$$\varepsilon = C_{ag} R_i. \quad (10)$$

Таким образом операторная функция коэффициента усиления однокаскадного реостатного усилителя действительно имеет вид (4).

$\varepsilon = C_{ag} R_i$, представляющая постоянную времени паразитных параметров — величина порядка $10^{-6} \div 10^{-9}$, т. е. величина малая по сравнению с величинами β_1, β_2 , а также с постоянными времени внешних связей, которые имеют величину порядка $10^{-2} \div 10^{-3}$. Постоянные времени связей очень велики по сравнению с внутриламповыми постоянными времени (они имеют порядок $10^{-2} - 10^{-3}$ sec).

При таком соотношении постоянных времени можно было заранее предположить, что суммарный переходный процесс должен распасться на две составляющие: 1) быстрые процессы, соответствующие малым постоянным времени; 2) основной процесс, соответствующий постоянным времени связей.

Математический анализ показал, что переходный процесс действительно распадается на указанные составляющие и что при определенных условиях составляющая, соответствующая постоянным времени связей, весьма близка к переходному процессу, соответствующему основной системе уравнений.

Перейдем к изложению основных моментов математического анализа.

Рассмотрим сначала вопрос о том, как изменяется системы линейных дифференциальных уравнений (3), если в них коэффициент усиления рассматривать не как постоянную величину, а как операторную функцию, определяемую формулой (4).

Подставив в систему (3) выражение для коэффициента согласно формуле (4), после умножения правой и левой части уравнения на знаменатель выражения (4) получим систему уравнений, описывающих матричную схему при учете собственных параметров усилителей, в следующем виде:

$$\sum_{i=1}^n a_{ik} S_1(\varepsilon p) (g_{ik} + C_{ik} p) \bar{U}_i - S_2(\varepsilon p) (g_k + C_k p) \bar{U}_k + S_2(g'_k + C'_k p) E_k = 0$$

$$k = (1, 2, \dots, n). \quad (11)$$

Введем для сокращения записи следующие обозначения:

$$A_{ik}(p) = g_{ik} + C_{ik} p, \quad A_k = g_k + C_k p,$$

$$e_k = A_k(p) E_k; \quad \bar{e}_k = S_2(\varepsilon p) A_k(p) E_k. \quad (12)$$

Тогда (11) переписывается следующим образом:

$$\sum_{i=1}^n a_{ik} S_1(\varepsilon p) A_{ik}(p) \bar{U}_i - S_2(\varepsilon p) A_k(p) \bar{U}_k = \bar{e}_k. \quad (13)$$

Соответственно система (3) при обозначении (12) может быть записана следующим образом:

$$\sum_{i=1}^n a_{ik} A_{ik}(p) \nu U_i - A_k(p) U_k = e_k. \quad (14)$$

Система уравнения (13) описывает действительный переходный процесс в нашей схеме при учете паразитных параметров [т. е. учитывает тот факт, что коэффициент усиления является операторной функцией вида (4)].

Вторая система уравнений, уравнение (14), соответствует решаемой системе уравнений, т. е. тому случаю, когда коэффициент усиления является величиной постоянной.

Покажем теперь, что процессы в схеме действительно распадаются на быстрые и медленные. Для этого докажем лемму из алгебры.

Лемма. Корни уравнения

$$a_0 + a_2 x + a_2 x^2 + \dots + a_{m-1} x^{m-1} + b_0 x^m + b_1 x^{m+1} \varepsilon + \dots + b_n x^{m+n} \varepsilon^n = 0 \quad (15)$$

при малых значениях параметра распадаются на две группы:

1) m корней $\bar{\lambda}_s (s=1, 2, \dots, m)$, отличающихся от m соответствующих корней λ_s уравнения

$$a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_{m-1} x^{m-1} + b_0 x^m = 0 \quad (15a)$$

тем меньше ³, чем меньше ε .

2) n корней $\bar{\lambda}_{m+s} = \frac{\bar{\rho}_s}{\varepsilon} (s=1, 2, \dots, n)$, где

$$\bar{\rho}_s \text{ весьма близки к корням уравнения } b_0 + b_1 y + b_2 y^2 + \dots + b_n y^n = 0. \quad (15b)$$

³ Это утверждение есть непосредственное следствие теоремы о непрерывной зависимости корней алгебраического уравнения от его коэффициентов.

В правильности этого утверждения легко убедиться, если умножить уравнение (15) на ϵ^n , и результат расположить по степеням $y = \epsilon x$ (не принимая во внимание значений y , близких к нулю).

Если к характеристическому уравнению:

$$\begin{vmatrix} A_{11}(\bar{\lambda})S_1(\epsilon\bar{\lambda}) - A_1(\bar{\lambda})S_2(\epsilon\bar{\lambda}), \dots, A_{1n}(\bar{\lambda})S_1(\epsilon\bar{\lambda}) \\ \dots \\ A_{n1}(\bar{\lambda})S_1(\epsilon\bar{\lambda}), \dots, [A_{nn}(\bar{\lambda})S_1'(\epsilon\bar{\lambda}) - A_n(\bar{\lambda})S_2'(\epsilon\bar{\lambda})] \end{vmatrix} = 0 \quad (16)$$

системы (13) применить приведенную лемму, то легко видеть, что его корни распадутся на две группы:

1) n небольших (средних) корней $\bar{\lambda}_s$, которые мало отличаются от корней λ_s характеристического уравнения:

$$\begin{vmatrix} \nu A_{11}(\lambda) - A_1(\lambda), \dots, \nu A_{n1}(\lambda) \\ \dots \\ \nu A_{n1}(\lambda), \dots, \nu A_{nn}(\lambda) - A(\lambda) \end{vmatrix} = 0 \quad (17)$$

системы (14);

2) n больших корней $\bar{\lambda}_s = \frac{\rho_s}{\epsilon}$, где числа ρ_s мало отличаются от соответствующих корней ρ_s уравнения:

$$\begin{vmatrix} a_{11}C_{11}S_1(\rho) - C_1S_2(\rho), \dots, a_{1n}C_{1n}S_1(\rho) \\ \dots \\ a_{n1}C_{n1}S_1(\rho), \dots, a_{nn}C_{nn}S_1(\rho) - C_nS_2(\rho) \end{vmatrix} = 0. \quad (18)$$

Таким образом переходный процесс распадается на две составляющие: 1) быстрые процессы, соответствующие большим корням, обусловленные паразитными параметрами; 2) основной процесс, соответствующий корням, близким к корням уравнения (14).

Для того чтобы „паразитные“ параметры усилителя мало влияли на работу схемы, необходимо, чтобы все быстрые процессы затухали, иначе говоря, чтобы большие корни уравнения (18) имели отрицательную действительную часть.

Наиболее легко условия затухания быстрых процессов вывести для случая, когда матрица коэффициентов при производных треугольная. Здесь следует различать два случая: а) когда непосредственные обратные связи с выхода усилителя на его вход отсутствуют, т. е. все $A_{kk} = 0$, б) когда непосредственные обратные связи с выхода усилителя на его вход имеют место.

В первом случае из равенства $A_{kk} = 0$ следует, что, как это непосредственно видно из (18), условие затухания новых быстрых процессов выполняется, так как корни уравнения $S_2(\rho) = 0$ отрицательны. Во втором случае то же условие сводится к тому, чтобы были отрицательны действительные части корней уравнения [ср. (2)]

$$a_{kk}C_{kk}S_1(\rho) - C_kS_2(\rho) = 0. \quad (19)$$

Как видно из (19), в этом случае в выражение, определяющее затухание больших корней, входят параметры емкостных связей. Следовательно, в этом случае все проводимости емкостных связей должны быть выбраны неизменными. Все коэффициенты в этом случае меняются путем

изменения отпайки a_{ik} на делителях напряжения. При этом корни каждого из уравнения (19) будут зависеть только от одного соответствующего значения a_{kk} . Это обстоятельство ни в коем случае не является помехой. Оно может быть учтено при помощи различного рода технических мероприятий, так как вопрос о возможности работы схемы с усилителями сводится в этом случае к устойчивости работы отдельных усилителей с обратной связью.

Технически второй случай имеет ряд преимуществ: отпадает необходимость иметь набор различных емкостей и сопротивлений и, кроме того, могут быть решаемы системы уравнений, в которых коэффициент при диагональном члене меньше, чем при недиагональном.

Перейдем к теореме⁴, устанавливающей критерий блужности решений систем (13) и (14).

Теорема. Пусть даны две системы линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами⁴:

$$\sum_{i=1}^n (\bar{g}_{ik} + \bar{C}_{ik}p) \bar{v}_{ik} (1 + \bar{\beta}_{ik}\epsilon p) \bar{U}_i = \bar{e}_k(t) \quad (13a) \quad (k = 1, 2, \dots, n)$$

и

$$\sum_{i=1}^n \nu_{ik} (g_{ik} + C_{ik}p) U_k = e_k(t) \quad (k = 1, 2, \dots, n), \quad (14a)$$

где коэффициенты g_{ik}, C_{ik}, ν_{ik} постоянны⁵ причем

$$\begin{vmatrix} \nu_{11}C_{11} \dots \nu_{1n}C_{1n} \\ \dots \\ \nu_{n1}C_{n1} \dots \nu_{nn}C_{nn} \end{vmatrix} \neq 0 \quad (20)$$

(т. е. систему (14a) нельзя свести к системе $m < n$ дифференциальных и $n - m$ алгебраических уравнений); коэффициенты $\bar{g}_{ik}, \bar{C}_{ik}, \bar{\nu}_{ik}$ зависят от ϵ и притом

$$\lim_{\epsilon \rightarrow 0} \bar{g}_{ik} = g_{ik}, \quad \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \bar{C}_{ik} = C_{ik}, \quad \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \bar{\nu}_{ik} = \nu_{ik}, \quad \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \bar{\beta}_{ik} = \beta_{ik},$$

β_{ik} — постоянные; функции $e_k(t)$ и $\bar{e}_k(t)$ обладают следующими свойствами: а) удовлетворяют на любом конечном промежутке $(0, T)$ условиям Дирихле; б) $\bar{e}_k(t) = O(\exp(ct))$, где c постоянная, не зависящая от ϵ ; в) $\bar{e}_k(t) \rightarrow e_k(t)$ при $\epsilon \rightarrow 0$ равномерно относительно t на любом конечном промежутке $(0, T)$; ϵ — положительная величина, не зависящая от t . Далее, пусть начальные значения функций \bar{U}_{k0} в системе (13a) связаны

⁴ Доказана И. С. Градштейном.

⁵ Читатель в системах (13a) и (14a) легко узнает системы (13) и (14). Коэффициенты в системе (13a) суть функции от ϵ , а потому вид диагональных членов в ней проще, чем в системе (13). Заметим, что эта теорема справедлива и в том случае, когда $L_{ik}(p)$ и $S_{ik}(p)$ суть многочлены от p любых степеней, т. е. когда (13a) и (14a) суть системы линейных уравнений любых порядков.

Можно себе представить следующим образом рациональное исследование какой-либо динамической системы при помощи матричных схем:

1) составляются уравнения системы; 2) уравнения приводятся к виду, удобному для решения их на моделях; 3) устанавливаются параметры модели; 4) проверяется устойчивость системы и в случае ее неустойчивости на основе конструктивных и других соображений подбираются такие параметры системы и знаки связей, чтобы система стала устойчивой; 5) определяются переходные процессы при различного рода возмущениях и разных начальных условиях, соответствующих аварийным и другим режимам работы системы; 6) снимается частотная характеристика системы; 7) определяются на схеме соотношения величин в установившемся процессе (при этом фактически решаются алгебраические уравнения).

Если же интерес представляет поведение неустойчивой системы или поведение ее в режиме, близком к неустойчивому, то для этой цели можно найти на модели решение дифференциальных уравнений в условиях расходящегося процесса.

В такой постановке вопроса видна целесообразность этих схем и для решения алгебраических уравнений, определяющих распределение напряжений и токов при установившихся процессах в устойчивых системах.

Даже само только определение устойчивости

динамических систем по критериям Рауса, Гурвица или Найквиста является очень трудоемким делом при большом числе уравнений, а на электрической схеме этот результат получается практически мгновенно.

Нельзя, конечно, требовать от наших схем, чтобы они решали любые системы алгебраических уравнений, источником которых могут быть, например, торговые операции, химия и т. п. Можно и желательно, разумеется, исследовать отдаленно применимость этих моделей и в этих областях, но это другая задача.

Литература

1. Л. И. Гутенмахер. Электрическое моделирование. Изд. АН СССР, 1943.
2. Л. И. Гутенмахер. Электрические цепи для приближенного решения системы уравнений. Доклады Академии наук СССР, т. XVII, № 4, стр. 162, 1945.
3. Л. И. Гутенмахер. Искусственное воспроизведение физических явлений для решения технических проблем. Известия Отделения технических наук АН СССР, стр. 434, № 4—5, 1945.
4. Л. И. Гутенмахер, Н. В. Корольков, В. А. Тафт. Электрические схемы для решения систем уравнений. Электричество, стр. 33, № 4, 1945.
5. И. С. Градштейн, В. А. Тафт. Влияние собственных параметров усилителей в матричных схемах. Известия Отделения технических наук АН СССР, № 1, 1946.
6. Гантмахер и Крейн. Осцилляционные матрицы. ГНТИ, 1940.

К статье И. С. Брука*

О МЕХАНИЧЕСКИХ МЕТОДАХ РЕШЕНИЯ СИСТЕМ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ*

(Электричество, № 11, 1945)

В статье члена-корреспондента Академии наук СССР И. С. Брука затронут вопрос о работе схем с усилителями. Наша статья (Электричество, № 4, 1945 г.) трактуется им односторонне в том смысле, что в ней, как пишет И. С. Брук, «рассматривается применение электрических схем с усилителями для решения систем *линейных алгебраических уравнений*» (курсив наш), в то время как 90% содержания статьи посвящено применению этих схем для решения *дифференциальных уравнений*. В статье, как это явно следует из аннотации, рассмотрены электрические цепи с усилителями, в которых переходные процессы описываются системами дифференциальных уравнений, а установившиеся — системами линейных алгебраических уравнений.

Если учесть, что нами доказана возможность приближенного решения при помощи этих схем дифференциальных уравнений динамических систем, то следствием этого является возможность применения этих схем и для решения всех тех линейных алгебраических уравнений, которыми

описываются установившиеся процессы в динамических системах. Если же в результате решения дифференциальных уравнений получается расходящийся процесс, то схема правильно воспроизводит именно такой процесс, что и требуется в этом случае. В этом и заключается особенность динамических схем с усилителями, которая совершенно ясна для всех тех, кто рассматривает процессы в них на основе теории дифференциальных уравнений.

Не останавливаясь здесь на ряде других моментов статьи И. С. Брука, следует только отметить, что математическая трактовка матричной схемы, как схемы кинематической, недостаточно точно отражает физические процессы, происходящие в схемах с усилителями, и не позволяет вследствие этого правильно осветить особенности этих схем и получить те в полной мере положительные результаты, которые получены нами.

**Л. И. ГУТЕНМАХЕР, И. С. ГРАДШТЕЙН,
Н. В. КОРОЛЬКОВ, В. А. ТАФТ**

* В порядке обсуждения. Редакция.



Теория амплидинно-сельсинной синхронно-следящей системы

Член-корреспондент Академии наук Армянской ССР, проф. А. Г. ИОСИФЬЯН,
инж. Б. М. КАГАН, инж. Н. Н. ШЕРЕМЕТЬЕВСКИЙ

В настоящее время в различных областях техники широко применяются синхронно-следящие системы. Синхронно-следящие системы имеют своей задачей осуществление синхронного вращения и поворота исполнительной оси при движении задающей оси. С помощью синхронно-следящих систем осуществляется автоматизация копировальных станков, регулирование дуговых печей, установка валков прокатных станов, управление механизмами гидротехнических сооружений, стабилизация и вращение различных механизмов в военной технике и т. п.

Первоначально синхронно-следящие системы строились на использовании специальных электрических машин (компенсированные генераторы переменного тока и т. п.). С развитием техники ионных приборов в синхронно-следящих системах появились усилители мощности на тиратронах.

В 1941 г. нами была предложена и тогда же осуществлена в виде лабораторного образца сель-

Изложена теория переходных процессов в амплидине. Выводятся дифференциальные уравнения для амплидинно-сельсинной синхронно-следящей системы. Анализируется влияние на устойчивость системы различных параметров. Приводится метод, позволяющий по усилительно-фазовым характеристикам системы определять продолжительность переходного процесса. Теоретические выводы подтверждаются экспериментами.

синная синхронно-следящая система с амплидином в качестве усилителя мощности. В настоящей работе освещаются основные вопросы теории амплидинно-синхронно-следящей системы.

Принципиальная схема. На рис. 1 представлена принципиальная схема амплидинно-сельсинной синхронно-следящей системы.

Эта система осуществляет при движении командной оси x синхронный поворот и вращение исполнительной оси y . Исполнительная ось (рабочий механизм) приводится во вращение через редуктор P приводным двигателем D , подключенным к зажимам амплидин-генератора A . Измерение угла рассогласования между командной осью x и исполнительной осью y осуществляется с помощью сельсинов CD и CP , работающих в так называемом трансформаторном режиме. Ротор сельсина-датчика CD механически связан с командной осью x и поворачивается при движении командной оси. Ротор сельсина-приемника CP через редукторную передачу связывается с исполнительной осью, так что при повороте исполнительной оси вращается и сельсин-приемник. Обмотки возбуждения амплидина питаются от усилителя. Обмотки действуют навстречу друг другу. При возникновении угла рассогласования между командной и исполнительной осями на вход усилителя поступает напряжение от сельсина-приемника. Ток в одной обмотке возбуждения амплидина увеличивается, а в другой уменьшается. В результате на зажимах амплидина появляется напряжение, которое заставляет приводный двигатель D поворачивать исполнительную ось, а с ней и сельсин-приемник в сторону уменьшения угла рассогласования. Напряжение на якоре приводного двигателя через стабилизирующий контур, образованный сопротивлением r и емкостью C , подается на вход усилителя. Эта обратная связь служит для ликвидации качаний в системе.

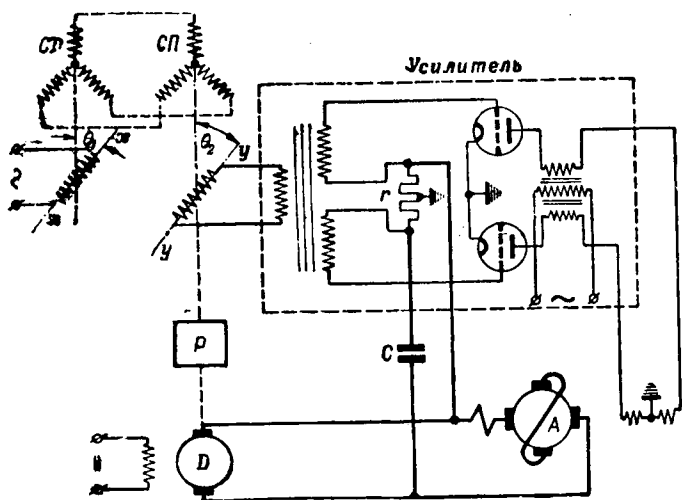


Рис. 1. Принципиальная схема сельсинно-амплидинной следящей системы.

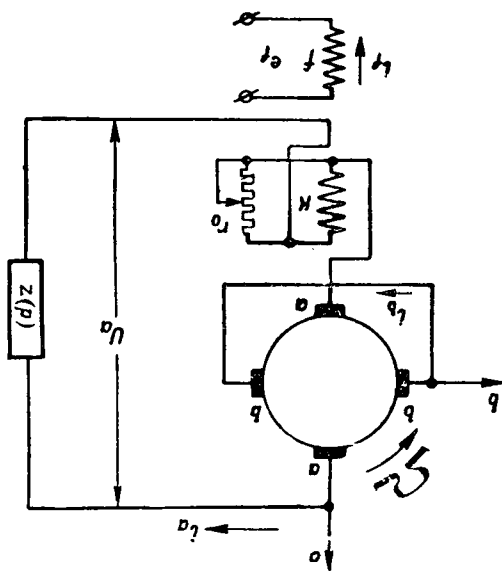


Рис. 2. Схема обмоток амплидина.

Начнем анализ системы с рассмотрения уравнений переходных процессов в амплидине.

Уравнения переходных процессов в амплидине. На рис. 2 представлена схема обмоток амплидина. Амплидин, как известно, представляет собой машину постоянного тока с щетками по продольной (ось a) и поперечной (ось b) осям машины, причем щетки поперечной оси замыкаются накоротко. Магнитный поток обмотки возбуждения амплидина (обмотка f) создает при вращении якоря э. д. с. на щетках bb . Щетки bb закорочены, поэтому достаточно небольшой э. д. с. на поперечных щетках, чтобы создать большой ток по поперечной оси машины. Поток реакции якоря по оси bb создает э. д. с. на щетках aa , с которых снимается напряжение на нагрузку. Компенсационная обмотка K служит для уменьшения реакции якоря на обмотку возбуждения.

Большое влияние степени компенсации реакции якоря по продольной оси амплидина на характеристики амплидина и устойчивость его работы часто делают необходимым регулировку этой величины уже в готовой машине. Это достигается изменением величины сопротивления r_0 , шунтирующего компенсационную обмотку амплидина.

Таким образом в машине имеются два каскада усиления мощности: обмотка возбуждения—поперечная ось и поперечная ось якоря—продольная ось якоря. Подобное выполнение машины позволяет получать высокие коэффициенты усиления по мощности при малых постоянных времени.

Пренебрегая потерями в железе и насыщением и считая, что поле в зазоре машины распределено синусоидально, можно написать следующие дифференциальные уравнения для э. д. с. и токов в якоря амплидина по продоль-

ной и поперечной осям через мгновенные значения потоко- сцепления [Л. 1]:

$$\begin{aligned} e_a &= i_a r_a + p\psi_a - \psi_b p\theta, \\ e_b &= i_a r_b + p\psi_b + \psi_a p\theta = 0. \end{aligned}$$

Здесь e_a и e_b — мгновенные значения напряжений на соответствующих щетках; i_a и i_b — мгновенные значения токов якоря по продольной и поперечной оси якоря; r_a и r_b — сопротивления якоря по продольной и поперечной оси машины; ψ_a и ψ_b — потоко- сцепления обмотки якоря, заключенной соответственно между щетками a — a и b — b ; p — оператор $\frac{d}{dt}$, $p\theta$ — мгновенное значение скорости вращения якоря.

Полагая $p\theta = \Omega = \text{const}$, получаем:

$$e_a = i_a r_a + p\psi_a - \psi_b \Omega, \quad (1)$$

$$e_b = i_b r_b + p\psi_b + \psi_a \Omega = 0. \quad (2)$$

Таким же образом могут быть написаны дифференциальные уравнения для э. д. с. и токов в компенсационной обмотке и обмотке возбуждения амплидина:

$$e_k = i_k r_k + p\psi_k, \quad (3)$$

$$e_f = i_f r_f + p\psi_f. \quad (4)$$

Кроме того, имеем:

$$e_k = i_0 r_0, \quad (5)$$

$$i_0 = i_a - i_k, \quad (6)$$

$$u_a = e_a + e_k, \quad (7)$$

$$u_a + i_a z_k = 0. \quad (8)$$

Пренебрегая коммутационными токами, найдем выражения потоко- сцеплений для обмоток амплидина:

$$\psi_a = L_a i_a - M_{ak} i_k - M_{af} i_f, \quad (9)$$

$$\psi_b = L_b i_b, \quad (10)$$

$$\psi_k = -M_{ak} i_a + L_k i_k + M_{kf} i_f, \quad (11)$$

$$\psi_f = -M_{af} i_a + M_{kf} i_k + L_f i_f, \quad (12)$$

где r_f , r_k и L_f , L_k — активные сопротивления и индуктивности обмотки возбуждения и компенсационной обмотки; M_{af} , M_{kf} , M_{ak} — коэффициенты взаимной индуктивности соответствующих обмоток.

Подставляя найденные значения потоко- сцеплений в формулы (1) — (4) и допуская, что коэффициенты при токах линейны, получаем:

$$e_a = (r_a + pL_a) i_a - L_b i_b \Omega - M_{ak} p i_k - M_{af} p i_f, \quad (1')$$

$$e_b = L_a i_a \Omega + (r_b + pL_b) i_b - M_{ak} i_k \Omega - M_{af} i_f \Omega = 0, \quad (2')$$

$$e_k = -M_{ak} p i_a + (r_k + pL_k) i_k + M_{kf} p i_f, \quad (3')$$

$$e_f = -M_{af} p i_a + M_{kf} p i_k + (r_f + pL_f) i_f. \quad (4')$$

Приравняв выражения (3') и (5), получаем:

$$i_k = \frac{r_0 + pM_{ak}}{r_k + r_0 + pL_k} i_a - \frac{M_{kf} p}{r_k + r_0 + pL_k} i_f, \quad (13)$$

$$i_k = \gamma i_a - \beta i_f,$$

где операторные выражения:

$$\gamma = \frac{r_0 + pM_{ak}}{r_k + r_0 + pL_k} \quad \text{и} \quad \beta = \frac{M_{kf} p}{r_k + r_0 + pL_k}$$

характеризуют влияние короткозамкнутого контура тока, образованного компенсационной обмоткой и шунтирующим сопротивлением r_0 на характеристики амплидина.

Подставляя найденные выражения для i_k в (1')—(4') и (7), получим следующую систему уравнений для амплитуды:

$$\begin{aligned} e_f &= -M_{af} \xi_3 p i_a + (r_f + pL_f - \beta M_{kf} p) i_f, \\ 0 &= \xi_1 L_a \Omega i_a + (r_b + pL_b) i_b - M_{af} \xi_4 i_f \Omega, \\ u_a &= (r_a + r_k \gamma + L_a p \varepsilon_1 + pL_k \varepsilon_2 \gamma) i_a - L_b i_b \Omega - M_{af} \xi_3 p i_f, \\ u_a + i_a z_n &= 0, \end{aligned} \quad (14)$$

где

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= 1 - \frac{M_{ak}}{L_a}, & \xi_1 &= 1 - \frac{M_{ak}}{L_a} \gamma, \\ \varepsilon_2 &= 1 - \frac{M_{ak}}{L_k}, & \xi_3 &= 1 - \frac{M_{kf}}{M_{af}} \gamma, \\ \varepsilon_3 &= 1 - \frac{M_{kf}}{M_{af}}, & \xi_4 &= 1 - \frac{M_{ak}}{M_{af}} \beta. \end{aligned}$$

Введем переходные полные сопротивления:

$$\begin{aligned} z_{aa} &= r_a + r_k \gamma + pL_a \varepsilon_1 + L_k \gamma \varepsilon_2, & z_{fa} &= -M_{af} p \xi_3, \\ z_{ab} &= -L_b \Omega, & z_{af} &= -M_{af} \xi_3 p, & z_{ff} &= r_f + pL_f - \beta M_{kf} p, \\ z_{ba} &= L_a \Omega \xi_1, & z_{bb} &= r_b + pL_b, & z_n &= r_n + pL_n z_n \\ z_{bf} &= -\Omega M_{bf} \xi_4. \end{aligned}$$

В этом случае уравнения (14) примут вид:

$$\left. \begin{aligned} e_f &= i_a z_{fa} + i_f z_{ff}, \\ 0 &= i_a z_{ba} + i_b z_{bb} + i_f z_{bf}, \\ u_a &= i_a z_{aa} + i_b z_{ab} + i_f z_{af}, \\ 0 &= u_a + i_a z_n. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Из уравнений (15) получаем выражение для токов:

$$\begin{aligned} i_a &= \frac{(z_{bb} z_{af} - z_{ab} z_{bf}) e_f}{z_{fa} (z_{bb} z_{af} - z_{ab} z_{bf}) + z_{ff} (z_{ba} z_{ab} - z_{aa} z_{ba}) - z_{ff} z_{bb} z_n}, \\ i_b &= \frac{(z_{aa} z_{bf} - z_{ba} z_{af} - z_n z_{bf}) e_f}{z_{fa} (z_{bb} z_{af} - z_{ab} z_{bf}) + z_{ff} (z_{ba} z_{ab} - z_{aa} z_{ba}) - z_{ff} z_{bb} z_n}, \\ i_f &= \frac{(z_{bb} z_{ab} - z_{aa} z_{bb} + z_n z_{bb}) e_f}{z_{fa} (z_{bb} z_{af} - z_{ab} z_{bf}) + z_{ff} (z_{ba} z_{ab} - z_{aa} z_{ba}) - z_{ff} z_{bb} z_n}. \end{aligned} \quad (16)$$

При отсутствии сопротивления, шунтирующего компенсационную обмотку амплидина ($r_0 = \infty$),

$$\xi_1 = \varepsilon_1, \xi_3 = \varepsilon_3, \xi_4 = 1; \gamma = 1, \beta = 0$$

и переходные полные сопротивления примут вид:

$$\begin{aligned} z_{aa} &= r_a + r_k + pL_a \varepsilon_1 + L_k \varepsilon_2, & z_{bb} &= r_b + pL_b, \\ z_{bf} &= -\Omega M_{bf}, \\ z_{ab} &= -L_b \Omega, & z_{af} &= -M_{af} p \varepsilon_3, & z_{fa} &= -M_{af} p \varepsilon_3, \\ z_{ff} &= r_f + pL_f, \\ z_{ba} &= L_a \Omega \varepsilon_1. \end{aligned}$$

В этом случае при $L_a = M_{ak} \varepsilon_1 = 0$ (реакция якоря полностью скомпенсирована); $L_a > M_{ak} \varepsilon_1 > 0$ (реакция якоря недокомпенсирована); при $L_a < M_{ak} \varepsilon_1 < 0$ (реакция якоря перекомпенсирована).

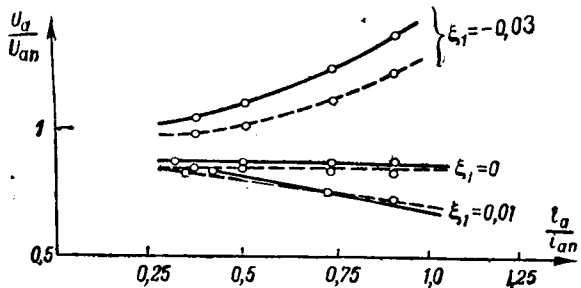


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные (пунктир) характеристики амплидина.

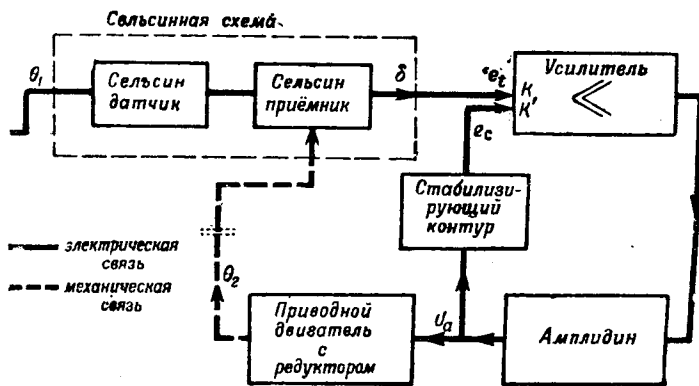


Рис. 4. Скелетная схема амплидинно-синхронно-следящей системы.

В установившемся режиме при шунтировании компенсационной обмотки амплидина сопротивлением r_0 имеем:

$$\gamma = \frac{r_0}{r_k + r_0}, \beta = 0,$$

$$\begin{aligned} \xi_1 &= 1 - \frac{M_{ak} r_0}{L_a (r_k + r_0)}, \\ \xi_3 &= 1 - \frac{M_{kf} r_0}{M_{af} (r_k + r_0)}, \\ \xi_4 &= 1. \end{aligned}$$

В этом случае имеем для i_a следующее выражение:

$$i_a = \frac{L_b \Omega^2 M_{af} e_f}{\left[r_b \left((r_a + r_k \frac{r_0}{r_k + r_0} + R_n) + L_b L_a \Omega^2 \left(1 - \frac{M_{ak} r_0}{L_a (r_0 + r_k)} \right) \right) \right] r_f} \quad (17)$$

На рис. 3 приведены нагрузочные характеристики амплидина, полученные расчетным путем по формуле (16). Принятое значение сопротивления r_b учитывает действие коммутационных токов.

Дифференциальные уравнения амплидинно-сельсинной синхронно-следящей системы. На рис. 4 изображена скелетная схема анализируемого следящего устройства. Схема позволяет легко выявить взаимосвязь и взаимодействие между отдельными элементами системы. Проанализируем работу системы по отдельным элементам.

Сельсинная схема. Сельсин-датчик *СД* подключен своей однофазной обмоткой к сети переменного тока. Однофазная обмотка сельсина-приемника *СП* включается на вход усилителя. Трехфазные обмотки сельсинов соединены между собой.

При таком включении сельсин-приемник работает в режиме трансформатора, первичной обмоткой которого является трехфазная обмотка, соединенная с трехфазной обмоткой сельсина-датчика, а вторичной обмоткой является однофазная обмотка, питающая сеточный трансформатор усилителя.

В согласованном положении задающей и исполнительной осей роторы сельсинов — датчика и приемника — взаимно повернуты относительно осей соответствующих фаз своих статоров на 90°. В этом случае напряжение на однофазной обмотке сельсина-приемника равно нулю, так как магнитный поток, созданный токами, протекающими

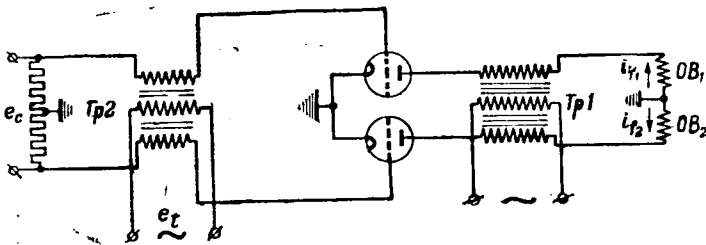


Рис. 5. Принципиальная схема усилителя.

по трехфазной обмотке приемника, не понижает однофазной обмотки.

Пусть θ_1 и θ_2 — углы поворота роторов датчика и приемника из согласованного положения. Тогда угол рассогласования между осями x и y :

$$\delta = \theta_1 - \theta_2. \quad (1)$$

При небольших скоростях синхронного вращения сельсинов можно считать с достаточной для практики точностью, если пренебречь потерями во входном трансформаторе усилителя, что э. д. с., индуцируемая в обмотке возбуждения сельсина-приемника, изменяется по закону синуса в функции угла рассогласования [Л. 2]:

$$e_+ = A \sin \delta_1.$$

Если ограничить анализ только малыми отклонениями, то

$$e_t = A \delta. \quad (II)$$

Усилитель. Усилитель (рис. 5) следящей системы работает как управляемый выпрямитель. Аноды ламп питаются переменным током от обмоток трансформатора $Tr1$. В анодную цепь включены действующие навстречу друг другу обмотки возбуждения амплидина OB_1 и OB_2 . Управляющее напряжение поступает на сетки ламп с сельсинного трансформатора $Tr2$, первичная обмотка которого соединена с обмоткой возбуждения сельсина-приемника. Управляющее напряжение на сетках ламп и анодное напряжение имеют одинаковую частоту.

В положении согласования напряжение от сельсинной схемы e_t на входе усилителя равно нулю. Если $e_c = 0$, то токи в обеих обмотках возбуждения амплидина равны между собой и их потоки взаимно уничтожаются.

При возникновении угла рассогласования на входе усилителя появляется напряжение e_t , величина которого зависит от величины угла рассогласования. В зависимости от знака угла рассогласования это напряжение находится в фазе или противофазе с анодным напряжением. Напряжение e_t увеличивает анодный ток одной лампы и уменьшает анодный ток другой лампы.

Кроме напряжения e_t сельсинной схемы на вход усилителя подается напряжение e_c от стабилизирующего контура.

Уравнение усилительного элемента для малых отклонений, при которых система может считаться линейной, будет:

$$ke_t + k'e_c = i_{f1} - i_{f2} = i_f, \quad (III)$$

где через i_f обозначена разность токов в обмотках возбуждения амплидина. В уравнении (III) k и k' — коэффициенты усиления для сигналов e_t и e_c .

и k' — коэффициенты усиления для сигналов e_t и e_c .

Амплидин. На рис. 2 представлена схема обмоток амплидина. Будем считать, что две действующие навстречу друг другу обмотки возбуждения амплидина заменены одной обмоткой, по которой протекает ток, равный разности токов в реальных обмотках возбуждения. Число витков этой обмотки равно числу витков каждой реальной обмотки возбуждения.

Уравнение (III) представляет собой уравнение для обмотки возбуждения амплидина. Мы пренебрегли постоянной времени цепи обмоток возбуждения амплидина, так как обмотка возбуждения амплидина включена последовательно с большим внутренним сопротивлением усилительных ламп.

На основании вышеприведенного анализа переходных процессов в амплидине [уравнения (15)] можно написать следующие дифференциальные уравнения для цепей по поперечной и продольной осям амплидина:

$$0 = i_a z_{ba} + i_b z_{bb} + i_f z_{bf}, \quad (IV)$$

$$u_a = i_a z_{aa} + i_b z_{ab} + i_f z_{af}. \quad (V)$$

Коэффициенты M_{af} и M_{kf} , входящие в выражения для переходных полных сопротивлений, представляют собой взаимдуктивность соответствующих обмоток с одной из реальных обмоток возбуждения амплидина.

Приводный двигатель. Напишем дифференциальное уравнение для токов и напряжения в цепи якоря приводного двигателя:

$$i_a z_m + \Phi p \theta_2 + u_a = 0. \quad (VI)$$

где u_a — напряжение на якоре двигателя; z_m — полное сопротивление якоря приводного двигателя; $\Phi p \theta_2$ — противо-э. д. с. двигателя, причем скорость вращения двигателя в rad/sec , измеренная на исполнительной оси:

$$p \theta_2 = \frac{p \theta}{i},$$

где $p \theta$ — скорость вращения самого двигателя; i — передаточное число между двигателем и исполнительной осью; Φ — коэффициент противо-э. д. с. якоря, отнесенный к скорости вращения исполнительной оси.

Уравнение движения исполнительной оси:

$$J p^2 \theta_2 + N p \theta = M_g = m i_a, \quad (VII)$$

где J — момент инерции всех подвижных частей, приведенный к исполнительной оси; N — коэффициент трения, отнесенный к скорости вращения исполнительной оси; m — коэффициент вращающего момента двигателя, отнесенный к исполнительной оси и определяемый с учетом к. п. д. редуктора.

Стабилизирующий контур. Состоит из последовательно-соединенных конденсатора C и сопротивления r .

Контур включается параллельно якору приводного двигателя на напряжение u_a . Напряжение e_c с сопротивления r снимается на вход усилителя.

Для контура rC имеем следующее дифференциальное уравнение:

$$u_a + ir + \frac{1}{Cp} i = 0, \quad e_c = ir, \quad e_c = -\frac{Tr u_a}{1 + Tr}, \quad (VIII)$$

где

$$T = rC.$$

Таким образом поведение следящей системы в переходном процессе описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \delta &= \theta_1 - \theta_2, \\ e_t &= A \delta, \\ Ke_t + K^1 e_c &= i_f, \\ 0 &= i_a z_{ba} + i_b z_{bb} + i_f z_{fb}, \\ u_a &= i_a z_{aa} + i_b z_{ab} + i_f z_{af}, \\ i_a z_m + \Phi p \theta_2 + u_a &= 0, \\ Jp^2 \theta_2 + Np \theta_2 - mi_a &= 0, \\ e_c &= -\frac{Tr u_a}{1 + Tr}. \end{aligned} \quad (18)$$

Решая систему уравнений (18) и принимая, что при $t = 0$ $p\theta_1, p\theta_2 = \dots = 0$, можем найти операторную функцию, связывающую угол рассогласования δ с углом поворота задающей оси θ_1 .

$$\delta = \frac{B_0 p^7 + B_1 p^6 + B_2 p^5 + B_3 p^4 + B_4 p^3 + B_5 p^2 + B_6 p}{A_0 p^7 + A_1 p^6 + A_2 p^5 + A_3 p^4 + A_4 p^3 + A_5 p^2 + A_6 p + A_7} \theta_1. \quad (19)$$

Уравнение (19) может быть представлено в следующем виде:

$$\delta = \frac{B_0 p^6 + B_1 p^5 + B_2 p^4 + B_3 p^3 + B_4 p^2 + B_5 p + B_6}{A_0 p^7 + A_1 p^6 + A_2 p^5 + A_3 p^4 + A_4 p^3 + A_5 p^2 + A_6 p + A_1} p\theta_1. \quad (19')$$

Одной из основных характеристик синхронно-следящей системы является коэффициент добротности D , представляющий собой отношение скорости ω_0 равномерного вращения задающей оси к углу рассогласования δ , соответствующему этой скорости:

$$D = \frac{\omega_0}{\delta}. \quad (20)$$

Учитывая, что при равномерном вращении задающей оси $p\theta_1 = \omega_0$, получаем из выражения (19') следующее значение для коэффициента добротности:

$$\delta = \frac{B_6}{A_7} \omega_0, \quad D = \frac{A_7}{B_6}.$$

Подставляя значения A_7 и B_6 , получаем значение коэффициента добротности для амплитудной системы:

$$D = \frac{KAL_3 M_{cf} \Omega^2}{\Phi r_b} \quad (21)$$

Выражение (21) показывает, от каких параметров зависит величина коэффициента добротности. Величина коэффициента добротности системы не зависит от степени компенсации ϵ_1 реакции якоря амплитуды.

В современных синхронно-следящих системах коэффициент добротности достигает

500—600 $\frac{1}{\text{сзс}}$. Это означает, что, например, при скорости вращения задающей оси в 100 градусов в секунду угол отставания исполнительной оси составляет всего 10'—12'.

Для увеличения коэффициента добротности необходимо увеличивать общий коэффициент усиления следящей системы (коэффициент A_7). Однако этому увеличению ставит предел возникающая в этом случае неустойчивость системы.

Анализ устойчивости синхронно-следящей системы. Обыкновенно к синхронно-следящим системам предъявляются высокие требования в отношении статической и динамической точности (коэффициент добротности), что заставляет выполнять систему с большим коэффициентом усиления. Большой коэффициент усиления способствует неустойчивости следящей системы, возникновению незатухающих колебаний исполнительной оси около заданного положения. Поэтому большой практический интерес имеют анализ устойчивости системы и определение влияния отдельных параметров схемы на характер переходных процессов.

Для системы дифференциальных уравнений (18) имеем следующее характеристическое уравнение:

$$A_0 p^7 + A_1 p^6 + A_2 p^5 + A_3 p^4 + A_4 p^3 + A_5 p^2 + A_6 p + A_7 = 0. \quad (22)$$

Синхронно-следящая система устойчива, если все корни характеристического уравнения (22) имеют отрицательную вещественную часть. Вопрос о том, выполняется ли это требование, может быть решен с помощью критериев Гурвица. Однако при высокой степени характеристического уравнения подсчет определителей Гурвица весьма сложен, и главное, что в этом случае с помощью этого критерия трудно вскрыть влияния отдельных параметров схемы на устойчивость системы.

Большие возможности для исследования устойчивости системы дает метод Найквиста [Л. 3, 4]. По этому методу решение вопроса об устойчивости системы сводится к анализу поведения системы в разомкнутом состоянии.

Для исследования необходимо разомкнуть цепь синхронно-следящей системы между любыми двумя элементами схемы, причем такими, которые удовлетворяли бы условию отсутствия обратного воздействия последующего элемента схемы на предыдущий элемент. Разорвем цепь воздействий между приводным двигателем и сельсином-приемником (рис. 4).

Обозначим через $K_{(r)}$ операторное выражение, связывающее мгновенные значения величин δ и δ' при разомкнутой цепи синхронно-следящей системы:

$$K_{(p)} = -\frac{\theta_2}{\delta}. \quad (23)$$

Это выражение носит название коэффициента усиления разомкнутой цепи.

Из выражения (23) $\theta_2 = -K_{(p)} \delta$.

В таком случае уравнение (I) может быть представлено в виде:

$$[1 - K_{(p)}] \delta = \theta_1. \quad (24)$$

Сравнивая выражения (24) и (19), получаем:

$$\frac{A_0 p^7 + A_1 p^6 + A_2 p^5 + A_3 p^4 + A_4 p^3 + A_0 p^2 + A_6 p + A_7}{B_0 p^7 + B_1 p^6 + B_2 p^5 + B_3 p^4 + B_4 p^3 + B_5 p^2 + B_6 p} = 1 - K(p).$$

Отсюда находим значение коэффициента усиления разомкнутой цепи:

$$K(p) = \frac{b_0 p^4 + b_1 p^3 + b_2 p^2 + b_3 p + b_4}{a_0 p^7 + a_1 p^6 + a_2 p^5 + a_3 p^4 + a_4 p^3 + a_5 p^2 + a_6 p}, \quad (25)$$

где

$$\begin{aligned} b_0 &= A_0, \quad a_1 = A_1, \quad a_2 = A_2, \quad a_3 = A_3, \quad a_4 = A_4, \quad a_5 = A_5, \quad a_6 = A_6; \\ b_0 &= B_3 - A_3, \quad b_1 = B_4 - A_4, \quad b_2 = B_5 - A_5, \quad b_3 = B_6 - A_6, \\ b_4 &= -A_7. \end{aligned}$$

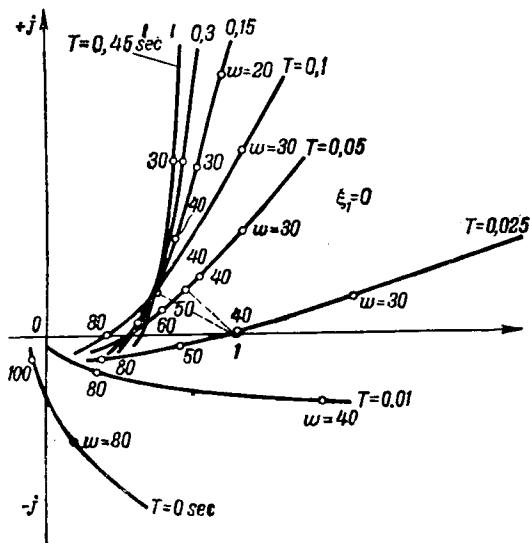


Рис. 6. Усилительно-фазовые характеристики амплитудной синхронной следящей системы при полной компенсации реакции якоря ($\xi_1=0$) для различных значений постоянной времени T стабилизирующего контура.

Подавая на вход разомкнутой цепи следящей системы гармонические колебания величины δ с частотой, изменяющейся от нуля до бесконечности, будем для каждой частоты отыскивать значение коэффициента усиления разомкнутой цепи. Это означает, что в выражении (25) для $K(p)$ надо p заменить на $j\omega$.

Кривые рис. 6 показывают, что при отсутствии стабилизирующего контура ($T=0$) система неустойчива, так как частотно-фазовая характеристика охватывает точку с координатами $+1, j0$. Введение в систему стабилизирующего контура приводит к тому, что частотно-фазовая характеристика с уменьшением частоты ω начинает более круто подниматься вверх. Из кривых следует, что, начиная с $T=0,025$ сек, система становится устойчивой.

Фазово-частотные характеристики позволяют не только определить, устойчива или неустойчива система, но дают возможность найти приблизительное значение декремента затухания собственных колебаний системы [Л, 5]. Для этого необходимо из точки $+1, j0$ провести нормаль к кривой фазово-частотной характеристики. Длина нормали до пересечения с кривой,

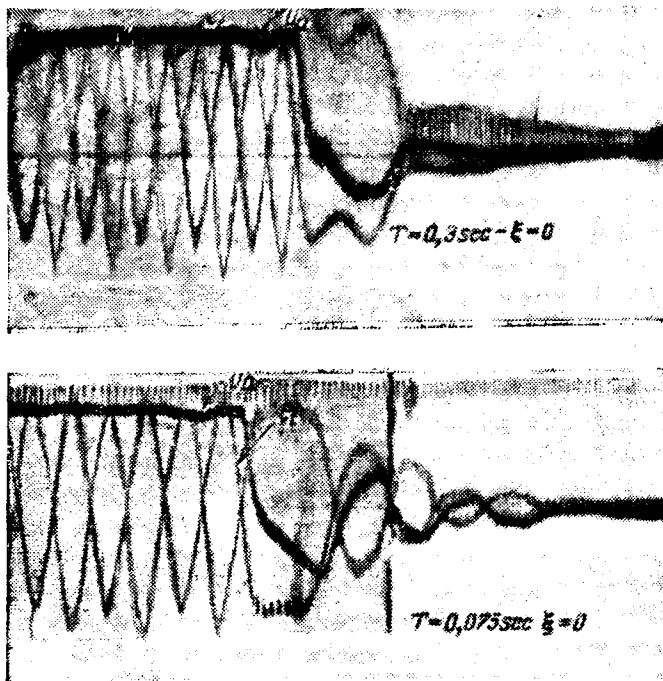


Рис. 7. Осциллограммы переходных процессов при внезапном возникновении угла рассогласований в синхронно-следящей системе при полной компенсации реакции якоря ($\xi_1=0$) и при различных значениях постоянной времени стабилизирующего контура.

взятая в масштабе изменения частоты вблизи основания нормали по кривой фазово-частотной характеристики, дает приблизительное значение декремента затухания (вещественная часть корня характеристического уравнения).

Кривые рис. 6 показывают, что с ростом величины постоянной времени T стабилизирующего контура увеличивается затухание системы. Оптимальным является $T=0,15$ сек, так как при дальнейшем увеличении постоянной времени T затухание не увеличивается. Этот вывод подтверждается и экспериментами.

Осциллограммы рис. 7 и 9в показывают, что при $T=0,15$ сек мы получаем минимальное время затухания колебаний в переходном процессе. При меньших значениях постоянных времени ($T=0,075$ сек), так же как и при больших ($T=0,3$ сек), получаем увеличение времени затухания колебаний.

Приблизительное значение времени затухания колебаний в переходном процессе может быть установлено непосредственно из частотно-фазовых характеристик. Действительно, определив вышеописанным методом по фазово-частотной характеристике декремент затухания ω , можно тем самым определить и постоянную времени огибающей экспоненты τ , так как $\tau = \frac{1}{\omega}$.

Можно принять 4τ за время затухания колебаний в переходном процессе. Для усилительно-частотной характеристики при $T=0,15$ сек (рис. 6), получаем $\omega = 11 \text{ } 1/\text{sec}$. Следовательно, время затухания переходного процесса $0,36$ сек, что достаточно близко совпадает с результатом, даваемым осциллограммами.

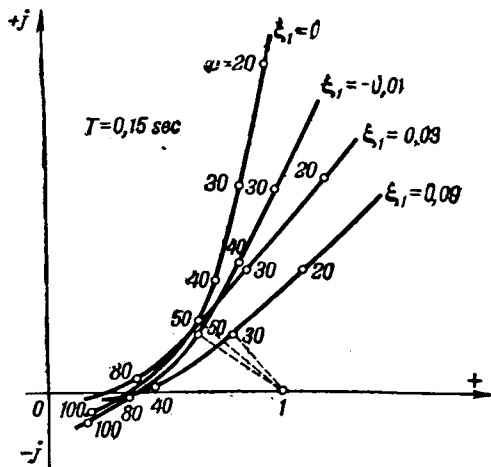


Рис. 8. Усилительно-фазовые характеристики синхронно-следящей системы при различных степенях компенсации реакции якоря амплитудина ξ_1 . Постоянная времени стабилизирующего контура $T=0,15$.

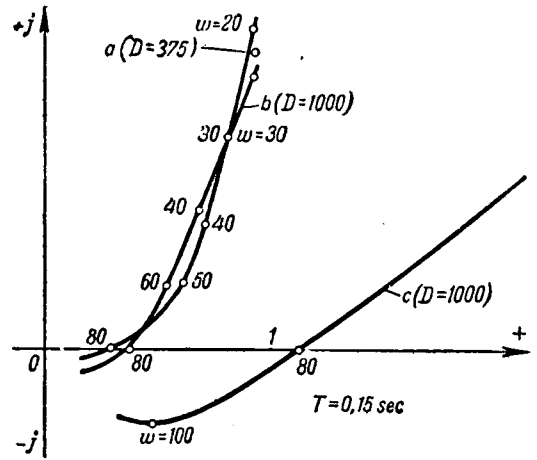


Рис. 10. Усилительно-фазовые характеристики синхронно-следящей системы при различных значениях коэффициента добротности.

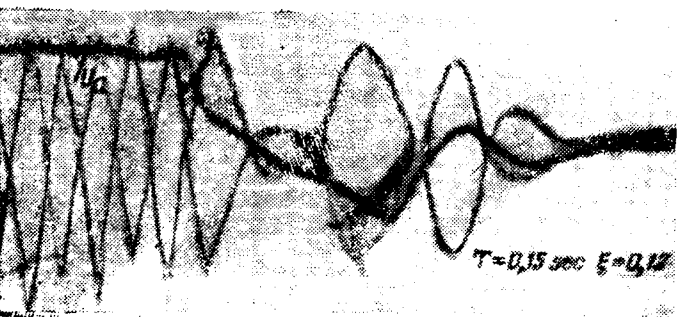
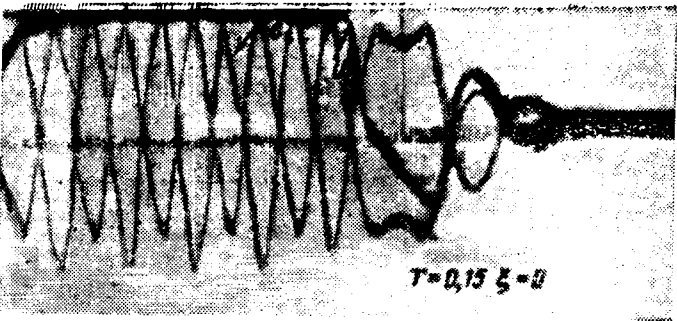
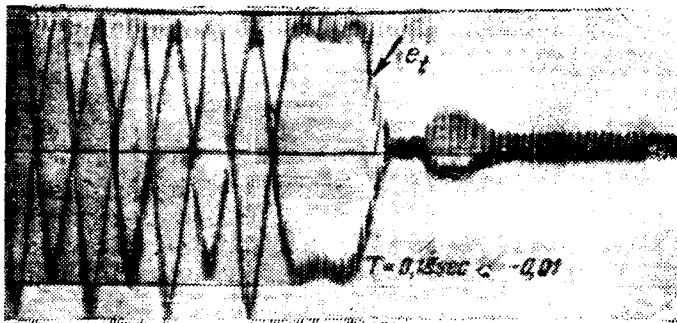


Рис. 9. Осциллограммы переходных процессов в синхронно-следящей системе при различных степенях компенсации реакции якоря амплитудина.

Из характеристик рис. 8 следует, что затухание в системе максимально при полной компенсации и уменьшается как при недокомпенсации, так и при перекомпенсации. Этот вывод подтверждается также осциллограммами (рис. 9) переходных процессов в системе, снятыми при различных степенях компенсации реакции якоря.

В случае необходимости увеличение коэффициента добротности системы может быть достигнуто за счет увеличения коэффициента усиления одного из звеньев цепи регулирования. Расчеты и эксперименты показывают, что с точки зрения обеспечения устойчивости системы не безразлично, в каком элементе системы увеличивается коэффициент усиления.

Для обеспечения устойчивой работы системы при необходимости повышения коэффициента добротности следует повышать коэффициенты усиления звеньев, охватываемых стабилизирующим контуром.

Увеличение коэффициента добротности в случае кривой *в* (рис. 10) достигнуто за счет увеличения числа витков в управляющих обмотках амплитудина, а для случая кривой *с* увеличение добротности достигнуто увеличением коэффициента *A*.

Приведенные кривые показывают, что при одном и том же значении величины коэффициента добротности в одном случае система устойчива (кривая *б*), а в другом неустойчива (кривая *с*).

Литература

1. А. Г. Иосифьян. Общая теория амплитудина. Известия АН Армянской ССР, IX, 1945.
2. А. Г. Иосифьян. Теория трансформаторного режима сельсинов в тиратронных схемах сельсино-синхронного управления. Бюллетень ВЭИ, № 9, 1940.
3. Nyquist. Regeneration Theory. Bell System Technical Journal, VII, 1932.
4. А. В. Михайлов. Метод гармонического анализа в теории регулирования. Автоматика и телемеханика, № 3, 1938.
5. Ludwig. Archiv für Electrotechnik, № 5, 1940.



Современные тенденции и задачи в области электрооборудования металлорежущих станков

Кандидат техн. наук В. Т. БЫБЫШЕВ

Москва

В современных металлорежущих станках механическое и электрическое оборудование так

тесно связаны, что составляют одно целое. Поэтому, от правильного выбора и монтажа электрооборудования в значительной мере зависит совершенство конструкции станка.

В годы, предшествующие войне, станкостроительная промышленность СССР встала на путь широкой электрификации станков. В качестве примера достаточно указать на агрегатные станки завода «Станкоконструкция» и завода им. Ленина, плоскошлифовальные станки Московского завода шлифовальных станков и др.

Однако в целом электрификация советских станков отставала от передового американского станкостроения. В наших станках совершенно недостаточно применялись электрическое регулирование скорости, электрическое торможение, электроавтоматическое управление, электрозажимные приспособления, сигнализация и т. п. Значительная доля вины в этом отставании лежит на электропромышленности, которая плохо снабжала станкостроение электродвигателями и аппаратурой, особенно специальных исполнений.

В 1940 г. в СССР было выпущено 58 437 шт. станков, состоящих примерно из 475 типоразмеров. Освоив к началу войны свыше 500 типоразмеров станков, советское станкостроение во время войны сократило номенклатуру выпускаемых станков с целью усиления основного внимания выпуску станков, необходимых для оборонной промышленности.

По новому пятилетнему плану годовой выпуск станков к концу пятилетки определяется в полтора раза выше довоенного. Предусмотрено увеличение в СССР парка металлорежущих станков до 1 млн. 300 тыс., что является одной из наиболее важных задач пятилетнего плана, связанных с дальнейшим техническим прогрессом во всех отраслях народного хозяйства.

Станкостроительная промышленность СССР должна расширить номенклатуру выпускаемых станков главным образом за счет значительного повышения выпуска специальных и агрегатных

Дан обзор развития электрификации металлорежущих станков в СССР и в США. Намечаются послевоенные перспективы электрификации выпускаемых в Союзе станков.

станков, применение которых в промышленности организует по-новому ритм производства и будет

диктовать новую технологию обработки в таких важнейших отраслях промышленности, как авто- и тракторостроение, энергомашиностроение, производство паровозов, вагонов, локомотивов, дизелей и т. п.

Не менее важной послевоенной задачей является также широчайшая автоматизация работы станков на электрической основе, с целью максимального повышения производительности труда рабочих и облегчения условий их работы.

США занимают ведущее положение по станкостроению среди капиталистических стран и являются новатором в разработке новых высокопроизводительных машин и станков. Интересно сопоставить уровень развития станкостроения в этой стране и в СССР.

Абсолютный рост станкостроительной промышленности США приведен в табл. 1, составленной по данным ЭНИМС.

Парк станков промышленности США, по данным Американской ассоциации машиностроителей, в апреле 1944 г. примерно исчислялся в 1 700 000 станков [Л. 1]. Из них 700 000 станков находились в эксплуатации более 3 лет, 350 000 — от 4 до 14 лет и примерно 650 000 станков эксплуатируются более 14 лет. Эти цифры показывают, что даже в такой передовой промышленной стране, как США, наряду с высокопроизводительными машинами и станками, имеется

Таблица 1

Годы	Произведено станков (тыс. шт.)	Стоимость выпущенной продукции (млн. долларов)
1919	40	161
1929	48	185
1933	6	24
1939	50	200
1940	100	400
1941	190	775
1942	350	1320
1943	295	1180
1944	125	—

весьма значительное количество устаревшей техники.

В табл. 2 произведено сопоставление удельных весов отдельных групп станков в станочном парке США и СССР на начало 1940 г.

Таблица 2

Удельный вес отдельных групп станков в станочном парке США и СССР (в процентах)

Наименование группы	США		СССР
	1935	1940	1940 (на 1 января)
Токарные	16,3	25,1	35,8
Револьверные	5,4		5,7
Автоматы и полуавтоматы	4,6		2,3
Фрезерные	9,1		8,0
Зуборезные	3,4	2,3	1,4
Расточные	3,9	2,9	1,0
Продольно-строгальные	2,3	1,7	1,5
оперечно-строгальные	2,9	2,9	3,2
Протяжные	0,5	0,6	0,1
Шлифовальные и заточные	18,4	17,3	6,9
Пригирочные и доводочные	0,3	0,3	Включены в проч.
Полировально-точильные	2,8	4,5	
Сверлильные (включая радиально-сверлильные)	19,7	20,9	20,2
Нарезные	2,6	3,1	2,8
Отрезные	4,3	4,7	
Прочие станки	3,4	3,7	12,1
Итого	100,0	100,0	100,0

Таблица 2 показывает оставание в довоенном станочном парке СССР по таким группам станков, как автоматы и полуавтоматы, по зуборезным, расточным, шлифовальным, протяжным и фрезерным.

В условиях войны в промышленности США заметно было все более широкое проникновение электрической энергии во все звенья ее производственного аппарата. На основе широкого внедрения электродвигателя в США создан целый ряд полностью электрифицированных и автоматизированных рабочих машин и станков. На базе гидравлики и электроавтоматики в станкостроении США в период войны были разработаны и построены автоматические линии — комплексы станков для обработки определенных деталей.

На заводе фирмы GEC в Вест-Линн [Л. 2] работает автоматически действующий пролет, в котором в определенной последовательности производится обработка литого корпуса электрического счетчика. В этом пролете, управляемом только 2 рабочими, установлено в один ряд 11 станков, снабженных гидравлическим передаточным механизмом. Один рабочий следит за загрузкой и выгрузкой корпусов, другой же следит за непрерывностью хода станков и их регулировкой. Все станки синхронно работают с передаточным механизмом через посредство схемы электрического управления и контроля.

Для ускорения обработки головок цилиндра авиадвигателя на заводе фирмы Райт в Петерсоне в 1941 г. была построена специальная поточная синхронно-действующая линия, состоящая из двух агрегатов с общим количеством станков в 73 единицы. Один агрегат содержит 16 стан-

ков-автоматов, производящих 25 операций. Второй агрегат состоит из 57 станков и производит остальные 40 операций обработки. Все 73 станка оснащены 94 различными инструментами и приспособлениями. Кроме станков в отдельных пунктах этой линии установлена аппаратура автоматического технического контроля обрабатываемых головок цилиндров. Эта автоматизированная линия заменяет несколько сотен обычных станков [Л. 3].

Особо следует остановиться на вопросе о развитии электрификации станков в США.

Индивидуальный электропривод отдельных узлов станков и синхронизация работы станков на электрическом принципе находят все более широкое применение, как обеспечивающие длительную и надежную работу станков. Кнопка во многих, особенно крупных, станках заменила ручку.

Широко используются электрические методы регулирования скорости станков путем применения регулируемых электродвигателей постоянного тока, комплектных приводов Леонарда, которые стали применяться не только в тяжелых, но и в средних токарно-винторезных станках (модель EE фирмы Монарх).

В мелких и средних станках, требующих широкого и плавного регулирования, используют привод с управляемыми ионными выпрямителями (тиратронами). Такие приводы (таймотроль и мототроль) выпускают фирмы GEC и Westinghouse.

В шлифовальных и сверлильных станках, а также во фрезерных станках для сверхскоростного фрезерования, нашли применение высокочастотные асинхронные электродвигатели, питаемые от специальных генераторов повышенной частоты.

Много сделано в США по применению в станках приборов для автоматического измерения обрабатываемых деталей.

Для станков, требующих особо точного управления (станки для глубокого сверления, для расточки кожухов паротурбин и т. п.), в США начинают применять амплидин [Л. 4].

Значительно увеличилось производство электрических копировально-фрезерных и копировально-токарных станков типа Келлер и Монарх. До войны копировально-фрезерные станки изготовляла одна фирма (Пратт Уитней), во время войны их выпускали 7 фирм.

Необходимо отметить, что еще до войны наши советские конструкторы значительно улучшили конструкцию копировально-фрезерных станков типа Келлер путем применения в них для подачи вместо электромагнитных муфт электродвигателей постоянного тока, включаемых через посредство управляемых тиатронов. Электрический копировально-фрезерный станок, модель 6441, выпущенный по этой схеме до войны Ленинградским станкозаводом им. Свердлова, по целому ряду технических показателей оказался лучше станка фирмы Келлер.

Таким образом рассмотрение современной техники электрификации станков показывает, что

задачи автоматизации работы станков все в большей мере разрешаются в станкостроении на основе широкого внедрения *электроавтоматического управления*.

Потребность станкостроительной промышленности СССР в электрооборудовании для комплектования выпускаемых станков резко возрастает количественно при одновременном усложнении номенклатуры, особенно в области аппаратуры для автоматического управления. Для обоснования указанной потребности ниже кратко намечаются основные пути дальнейшего технического развития электрификации выпускаемых в СССР станков.

Основным типом приводного электродвигателя для большинства станков безусловно останется трехфазный асинхронный короткозамкнутый двигатель, обеспечивающий в силу простоты своего устройства надежность и бесперебойность работы станка.

Регулируемые двигатели постоянного тока будут применяться в приводах тяжелых станков при требованиях широкого и плавного регулирования скорости, в карусельных и лобовых токарных станках для регулирования скорости по ходу производственного процесса, а также в станках с возвратно-поступательным движением при большом числе реверсов и в случае соединения машин по схеме Леонарда.

Для новых серий продольно-строгальных станков и для тяжелых станков необходимо освоить серию защищенных электродвигателей постоянного тока от 60 до 200 кВт с регулируемой скоростью 1:3 ÷ 1:4, а также двигателей постоянного тока крупной мощности (порядка до 200 кВт) с пониженным значением махового момента и повышенной перегрузочной способностью. Кроме строгальных станков, привод по схеме Леонарда найдет применение в шлифовальных станках, мелких прецизионных токарных станках и т. п.

Заслуживает большого внимания и быстрее внедрения в практику станкостроительной и особенно электротехнической промышленности опыт электропромышленности США по усовершенствованию и *упрощению* схем, а также снижению стоимости комплектных приводов постоянного тока, регулируемых за счет изменения напряжения.

В приводах Леонарда при малых мощностях стоимость аппаратуры управления и возбужде-

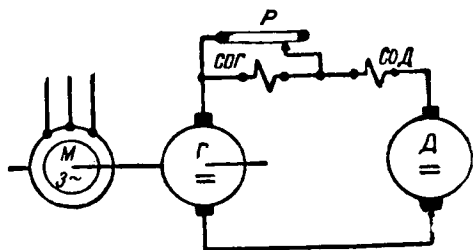


Рис. 1. Привод Леонарда с последовательным самовозбуждением.

Г—генератор; М—двигатель агрегата Леонарда; Д—станка; СОД—серийная обмотка двигателя; СОГ—генератора; Р—реостат.

ля составляет основную часть стоимости привода. Исключение из схемы возбуждателя при одновременном удешевлении аппаратуры управления позволило бы значительно снизить стоимость такого электропривода. Одно из таких решений в виде системы Леонарда с последовательным возбуждением генератора и двигателя и изменением напряжения представлено на рис. 1.

Как видно из рис. 1, возбуждателя в схеме нет. Аппаратура управления схемы состоит из магнитного пускателя с кнопками и реостата для регулирования скорости. Механическая характеристика привода показана на рис. 2. Наличие в схеме серийного электродвигателя обеспечивает высокий пусковой момент привода. По американским данным при установке скорости по реостату, равной $1/10$ от максимальной, пусковой момент привода в 5 раз больше момента при полной нагрузке¹. Пуск в ход осуществляется весьма плавным путем включения в сеть мотор-генератора.

Эти приводы обычно применяются для длительной работы при диапазоне регулирования 1:10.

Фирма Лэндис применяет схему рис. 1 для привода изделия на шлифовальных станках при мощности до 0,75 кВт. Для более крупных приводов (до 11 кВт) серийный двигатель снабжают специальной тормозной обмоткой, которая контактором ТК (рис. 3) присоединяется к якорию электродвигателя.

Заслуживает внимания также упрощенный привод постоянного тока с регулируемым напря-

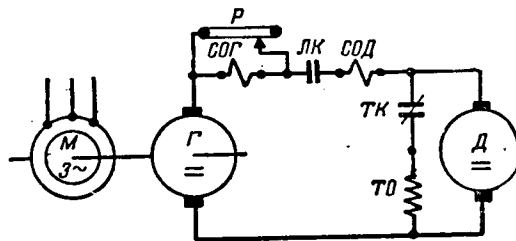


Рис. 3. Привод Леонарда с последовательным возбуждением и динамическим торможением специальной тормозной обмоткой.

Г—генератор; М—двигатель агрегата Леонарда; Д—станка; СОГ—серийная обмотка генератора; СОД—двигателя; ТО—тормозная обмотка; ТК—тормозной контактор; ЛК—линейный; Р—реостат;

¹ Подробнее по этому вопросу см. ст. А. С. Сандлера и Н. Г. Соколова «Регулирование скорости серийного двигателя, питаемого от серийного генератора», Вестник электропромышленности, № 7—8, 1945.

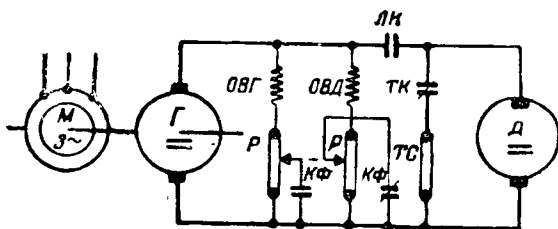


Рис. 4. Привод Леонарда с шунтовым самовозбуждением и динамическим тогможением.

Г—генератор; М—двигатель агрегата, Д—станка, ОВГ—обмотка возбуждения генератора, ОВД—двигателя; ТС—тормозное сопротивление; Р—реостат; ТК, ЛК, КФ—контакты (тормозной, линейный и форсировки).

жением и с самовозбуждением, схема которого приведена на рис. 4.

Как видно из рис. 4, шунтовой электродвигатель привода и питающий его генератор возбуждаются непосредственно от последнего. Генератор должен обладать большей устойчивостью при значительном понижении напряжения. Для расширения предела регулировки в данном приводе должен применяться генератор, обеспечивающий устойчивую работу при 25% номинального напряжения, что позволит обеспечить регулировку скорости более чем 1 : 3.

Шунтовая обмотка электродвигателя должна обеспечить его полное возбуждение при напряжении генератора, равном 1/3 номинального напряжения, т. е. в точке устойчивой работы. При применении в приводе двигателя с регулировкой в шунте в пределах 1 : 4 общий предел регулирования привода может достигать 1 : 12. Регулирование скорости в этом случае осуществляется двумя механически связанными между собой реостатами, включенными в цепь возбуждения генератора и двигателя.

Механические характеристики привода для схемы рис. 4 приведены на рис. 5. Наибольшая жесткость характеристик имеет место (рис. 5) при работе двигателя с полным магнитным потоком и при полном напряжении генератора.

Данный привод обычно работает с непрерывно вращающимся генератором, так как для возрастания магнитного потока в шунтовом генераторе с самовозбуждением необходим некоторый промежуток времени. Управление электродвигателем привода осуществляется линейным контактором, включенным в цепь якорей генератора и двигателя. Кроме того, в схеме рис. 4 обычно предусматривается реле, обеспечивающее при включенном линейном контакторе полное возбуждение двигателя и минимальное возбуждение генератора, равное 1/3 номинального, что необходимо для плавного разгона привода.

Следующей модификацией регулируемых приводов, применяемых в США, является привод по схеме Леонарда с вращающимся регулятором напряжения — возбудителем ротороля, схема которого приведена на рис. 6.

Ротороля, сидящий на валу генератора (рис. 6), включен в диагональ моста. В два плеча моста включены обмотки возбуждения генератора ШОГ и ротороля ШОР. Остальные два плеча состоят из сопротивлений, равных по величине сопротивлению обмоток возбуждения

моста. Значения отдельных сопротивлений моста подобраны так, чтобы все плечи его имели одинаковое сопротивление и мост был уравновешен. К обмоткам возбуждения генератора ШОГ подводится ток от возбудителя В и дополнительно от ротороля.

Ротороля имеет 4 обмотки возбуждения, две из них, как указывалось, включены в плечи моста, одна шунтовая ШОР' приключена параллельно зажимам генератора Г. Серийная обмотка СОП включена последовательно в цепь приводного двигателя Д. Обмотки возбуждения ШОР и СОП включены между собой согласованно и навстречу обмотке возбуждения ШОР' ротороля (см. схему в правом верхнем углу рис. 6).

Электродвижущая сила ротороля является функцией равнодействующих ампервитков всех этих трех обмоток. Ампервитки каждой обмотки ротороля рассчитаны так, что при холостом ходе двигателя Д равнодействующая их равна нулю. При других режимах работы в ротороле возникнет э. д. с., которая вызовет появление дополнительного тока в плечах моста; направление тока будет согласованное или встречное току, поступающему от возбудителя В. Протекание дополнительного тока в обмотке возбуждения

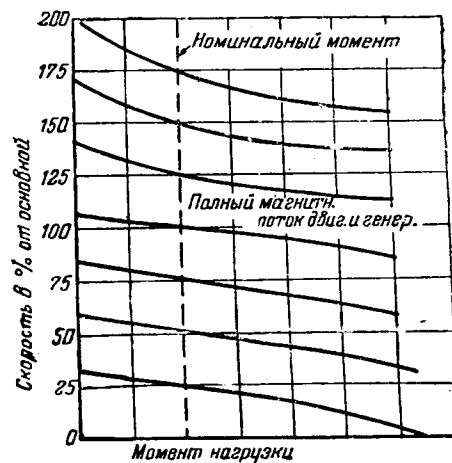


Рис. 5. Механические характеристики привода Леонарда с шунтовым самовозбуждением.

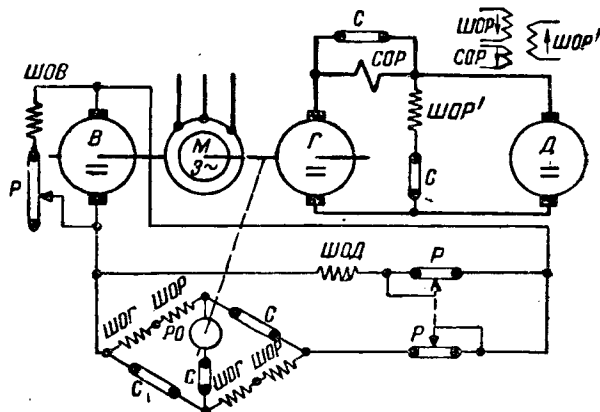


Рис. 6. Привод Леонарда с вращающимся регулятором напряжения типа ротороля.

Г—генератор; В—возбудитель; М—двигатель агрегата, Д—станка, РО—регулятор ротороля; ШОГ—шунтовая обмотка генератора; ШОД—двигателя, ШОВ—возбудителя; ШОР и ШОР'—регулятора; СОП—серийная обмотка регулятора; С—сопротивления; Р—реостат.

ШОГ генератора соответственно изменяет величину его э. д. с., что обеспечивает постоянство скорости вращения приводного двигателя *D*.

Применение регулятора ротороль позволяет значительно увеличить *пределы регулирования* приводного двигателя *D* за счет частичного размагничивания генератора *G* путем изменения направления равнодействующей ампервитков обмоток возбуждения ротороля.

Указанными выше мероприятиями в данном приводе удастся достигнуть регулирования скорости электродвигателя *D* в пределах 1:120 [Л. 3, 8—11].

Комплектные регулируемые приводы по схеме Леонарда с регулятором ротороль с 1942 г. изготавливаются в США фирмой Westinghouse и применяются довольно широко, главным образом в приводах тяжелых станков.

Для иллюстрации преимуществ, даваемых этим регулятором в приводах тяжелых станков, приведем (табл. 3) [Л. 5] сопоставление результатов испытания по обработке одинаковых деталей на двух продольно-строгальных станках, одного с шириной стола 42" с приводом ротороль, другого с шириной стола 36" с приводом от регулируемого в шунте электродвигателя постоянного тока, допускающего регулировку 1:6. Одновременно в таблице 3 даны схемные показатели приводов.

Надо отметить, что увеличение стоимости

Таблица 3

Показатели	Станок со столом 42" с приводом ротороль	
	Станок со столом 42" с приводом ротороль	Станок со столом 36" с приводом от регулируемого в шунте двигателя постоянного тока
А. Производственные показатели		
Максимальная скорость резания, м/мин	45,7	45,7
Минимальная скорость резания, м/мин	1,83	9,14
Скорость обратного хода, м/мин	73,15	45,7
Затрата времени на обработку одной детали, мин	125	190
Вес металла, снятого с детали, кг/мин	0,91	0,623
Б. Упрощение схемы привода		
Количество контакторов в схеме, шт.	2	9
Число включений контакторов на один ход стола станка	2	14
Количество реле в схеме	7	8
Число включений реле на один ход стола станка	5	7
Количество блокировок	2	8
Количество блокировок на один ход стола станка	2	12
В. Стоимость		
Первоначальная стоимость привода (стоимость регулятр. двигателя от 200 до 1200 об/мин. принята за единицу)	1,5	1
Первоначальная стоимость привода (стоимость регулятр. двигателя от 100 до 600 об/мин. принята за единицу)	1,25	1

станка с приводом ротороль составит только около 10%, при одновременном повышении производительности станка на 15—20% и более.

Внедрение в практике станкостроения *ионного привода* идет весьма медленно. Приводы станков при сравнительно небольшой мощности, предъявляя сложные требования к регулированию, в то же время ставят весьма жесткие требования к габаритным размерам установки.

Обладая рядом преимуществ по сравнению с обычной системой Леонарда (безинерционность управления выпрямленным напряжением, устойчивая работа на всем диапазоне регулирования, высокий к. п. д., сокращение строительных расходов, большие возможности для автоматизации и т. п.), привод, управляемый ионными выпрямителями, имеет следующие недостатки: а) низкое значение $\cos \varphi$ при снижении скоростей вращения приводного двигателя; б) дополнительные потери и нагрев приводного двигателя, обусловливаемые пульсирующим характером выпрямленного тока²; в) сложность устройства установки, требующей для ухода в эксплуатации наличия высококвалифицированного персонала.

Следует отметить, что в американской литературе нет еще вполне установившейся точки зрения на области применения ионного привода. Однако, число фирм, изготавливающих в США комплектные приводы с управляемыми выпрямителями, все же растет. В 1942 г. этих фирм было 2, в середине 1944 г. их число дошло до 5.

Таблица 4

Сравнение технико-экономических показателей регулируемых приводов постоянного тока

Вид электропривода	Степень сложности	Относительная стоимость	Пределы регулирования скорости			Сравнительное падение скорости
			Изменением напряжения	Изменением тока возбуждения в шунте	Общий диапазон регулирования	
С последовательными возбуждением и изменением напряжения, без возбуждителя (схема Леонарда)	1	1	1:10	—	1:10	4
С регулированием напряжения и самовозбуждением (без возбуждителя)	2	2	1:3	1:4	1:12	4
С обычным регулированием (схема Леонарда с возбуждителем)	3	3	1:10	1:4	1:40	2
С управляемым ионным выпрямителем (ионный привод)	4	4	1:10	1:4	1:40	3
С применением вращающегося регулятора напряжения по типу ротороля и широким регулированием скорости	5	5	1:60	1:2	1:120	1

² По американским данным это обстоятельство позволяет использовать только 75% номинальной мощности, а при низких скоростях еще меньше.

В табл. 4 приведено сравнение различных видов регулируемых приводов постоянного тока, основанное на данных практики промышленности США [Л. 8, 3].

Табл. 4 следует безусловно рассматривать как ориентировочную, так как она основана на данных машин США. Например, безусловно завышены в табл. 4 пределы регулирования двигателей изменением возбуждения (1:4 вместо 1:2,5+1:3). Занижены пределы регулирования ионного привода изменением напряжения; по американским данным они составляют 1:20.

На основе американской практики можно в настоящее время считать, что при мощностях порядка 5—10 кВт приводы с управляемыми ионными выпрямителями вполне конкурентоспособны с обычной схемой Леонарда.

Для привода мощных станков, требующих плавного регулирования скорости при постоянной мощности, наиболее рациональным является применение регулируемых двигателей постоянного тока в комбинации с коробкой скоростей.

При электрическом управлении станком, когда операции пуска, реверса и торможения станка осуществляются за счет управления приводным электродвигателем, а также и при автоматизации вспомогательных приводов станков возникает необходимость иметь для станкостроения специальные типы короткозамкнутых электродвигателей, предназначенных для работы при повторно-кратковременном режиме с большим числом включений.

Многоскоростные электродвигатели переменного тока (с переключением полюсов) также необходимы станкостроению для приводов станков, где требуется изменение скорости по ходу технологического процесса (например, получение ускоренных ходов, изменение скорости шпинделя при повороте револьверной головки в револьверных станках и т. п.). Они необходимы также в станках, где применение этих двигателей позволит упростить коробки скоростей.

Основная тенденция современного развития электропривода — *максимальное приближение двигателя к рабочему валу*, — вызывает дальнейшее расширение применения на станках, кроме нормальных двигателей на лапах, двигателей встроенных, фланцевых и пристроенных как в защищенном, так и особенно в закрытом исполнении с наружным обдувом.

Весьма актуален для станкостроения вопрос выпуска *электродвигателей со специальной изоляцией*, стойкой против чугунной пыли. Опыт эксплуатации американских электродвигателей с такой изоляцией на автозаводе им. Сталина показал, что эти двигатели по сравнению с ответственными защищенными двигателями имеют в несколько раз меньшую аварийность.

Не менее важно, особенно для приводов с большим числом включений, внедрение в практику электропривода тепловых реле, встроенных непосредственно в электродвигатели. Фирма Westinghouse применяет для этой цели специальные тепловые реле. Электродвигатели, снабжен-

ные таким устройством, носят в США название «термогардмотор».

Одной из первоочередных задач настоящего времени является внедрение *автоматического контроля работы смазочных систем станков*. Для этой цели необходимо освоить производство следующих реле: с ртутным контактом, — контролирующее прохождение струи масла, давления, — контролирующее давление в смазочной системе, и реле уровня — контролирующее уровень масла в баках и фильтрах.

Не менее важна проблема широкого внедрения в практику станкостроения, особенно на шлифовальных станках, приборов для *автоматического контроля размеров детали* в процессе ее обработки на станках. Для этой цели необходимо как можно скорее организовать производство измерительных головок как контактных, так и индуктивных, комплектных приборов автоматического измерения наружных и внутренних диаметров деталей в процессе обработки на шлифовальных станках, предельных измерителей с сеточным контактом и т. п.

Для правильного контроля нагрузки станков с точки зрения использования мощности электродвигателей необходимо освоить амперметры переменного тока специального исполнения, стойкие к кратковременным пусковым токам короткозамкнутых электродвигателей.

Необходимо также в самом срочном порядке восстановить установку на выпускаемых станках приборов местного освещения, организовав для этой цели крупносерийное производство шарнирных кронштейнов, светильников (арматур), понизительных трансформаторов и т. п.

Большие задачи, поставленные перед станкостроением в области увеличения производства агрегатных станков и полуавтоматических линий для массового производства деталей, настоятельно требуют широкой электроавтоматизации этих станков.

Литература

1. M. Leach. The Future of the Machine Tool Industry. Iron Age, v. 153, № 15, p. 55—57, 13 April 1944.
2. Seventy-Seven. Machining Operations Performed by Automatic Multiple Station Equipment. Machinery, N. Y., v. 48, № 4, p. 155, 1941.
3. J. G. Schlesinger. Wright Ready to Power Bombers. Automotive and Aviation Industries, v. 86, II, p. 25, № 3, 1942.
4. Automatic Control of Boring Mills. Machinery, L., v. 61, p. 401—403, № 1565, 1942.
5. Westinghouse Variable Voltage Planer Drive. Canadian Limited Head Office and Work. Hamilton, Ontario. Bull. H. 7050—A.
6. S. Fendley. Electronic Motor Control, GER, v. 46, p. 225—232, № 4, 1943.
7. S. Fendley. Electronic Variable Speed Drive for Machine Tools, Iron Age, v. 151, p. 58—61, № 11, 1943.
8. C. Caldwell. Direct-Current Adjustable-Speed Drives for Machine Tools, Machinery, N. Y. 1) v. 49, p. 207—211, № 8, 1943. 2) v. 49, № 9, p. 173—176; 3) v. 49, p. 208—211, № 11, 1943.
9. G. Caldwell and W. Formholls. Electrical Drives for Wide Speed Ranges. El. Eng., p. II, p. 54—56, 1942.
10. F. Burt. Adjustable Voltage Skip Hoist Control, Iron and Steel Engineer, v. XIX, p. 38—40, 1942.
11. Г. А. Анищенко. Рототроль (Принцип действия и методика расчета). Вестник электропромышленности стр. 9—12, № 10—11, 1945.



Электрическое оборудование гребной установки турбоэлектроходов „Иосиф Сталин“ и „Вячеслав Молотов“

Кандидат техн. наук, доц. И. Р. ФРЕЙДЗОН

Ленинград

Началом практического применения электродвижения судов можно считать 1900 г., когда началось более широкое строительство подводных лодок. Опыт, полученный при постройке первых подводных лодок, был перенесен на строительство надводных судов. В 1903 г. появляются первые дизель-электроходы, построенные в России. Это — нефтеналивные суда «Вандал» и «Сармонт» водоизмещением в 1 100 т. Примерно в это же время в Германии был построен первый турбоэлектроход «Вулкан». Всего до настоящего времени во всем мире построено около 300 дизель-электроходов общей мощностью около 350 тыс. л. с. на валах и 150 турбоэлектроходов общей мощностью около 1 800 тыс. л. с. на валах, не считая военных судов подводного флота.

Турбоэлектроходы «Иосиф Сталин» и «Вячеслав Молотов», оборудованные гребными электроприводами переменного тока, являются первыми кораблями такого рода в нашем Союзе.

Турбоэлектроходы имеют следующие судостроительные данные: судно — товаро-пассажирское; длина между перпендикулярами — 135,7 м, ширина — 18,35 м, осадка в грузу — 6,35 м, водоизмещение — 8 900 т, скорость — 20—16 узлов, число винтов — 2.

Дается описание основных элементов электромашиного оборудования и управления гребной установки турбоэлектроходов, приводятся данные испытаний и в заключение указываются общие преимущества электрификации гребного привода морских судов.

Общий вид турбоэлектрохода «Иосиф Сталин» дан на рис. 1.

Общие сведения о гребной электрической установке. Гребная установка турбоэлектроходов «Иосиф Сталин» и «Вячеслав Молотов» в основном состоит из четырех котлов Бабкок и Вилькокс, двух турбогенераторов и двух гребных электродвигателей переменного тока.

Каждый гребной электродвигатель работает от своего генератора. Путем соответствующего переключения оба электродвигателя можно присоединить к любому из генераторов (рис. 2). Изменения направления вращения гребных электродвигателей производятся с помощью двухполюсных реверсивных кулачковых переключателей переднего и заднего хода. Изменение скорости вращения гребных электродвигателей осуществляется регулированием скорости главных турбин.

Когда работают оба генератора, число оборотов обоих электродвигателей может быть разным и изменяется независимо одно от другого. При работе же обоих электродвигателей от одного генератора число их оборотов одно и то же.

Когда работают оба генератора, число оборотов обоих электродвигателей может быть разным и изменяется независимо одно от другого. При работе же обоих электродвигателей от одного генератора число их оборотов одно и то же.

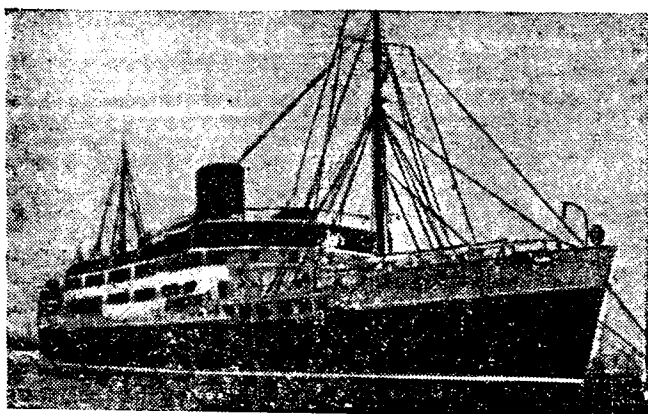


Рис. 1. Общий вид турбоэлектрохода.

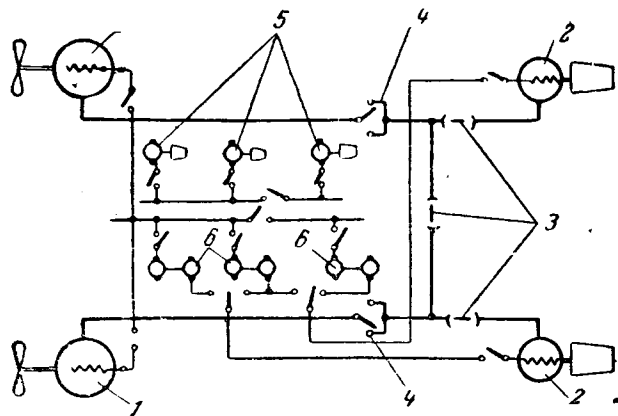


Рис. 2. Принципиальная схема главных соединений.

1—гребные электродвигатели; 2—турбогенераторы; 3—разъединитель; 4—реверсивные переключатели гребных электродвигателей; 5—вспомогательные турбодвигатели постоянного тока; 6—возбудители генератора.

же, но направление вращения может быть разным. При работе каждого генератора на свой гребной двигатель скорость судна составляет 20 узлов, мощность на валах 12 тыс. л. с. Когда один турбогенератор работает на два гребных двигателя, тогда судно развивает скорость 16 узлов при мощности на валах 5 500 л. с.

Управление гребной установкой осуществляется из машинного помещения, где расположен пульт управления и распределительный щит постоянного тока.

Ближе к носовой части корпуса находятся два котельных помещения, разделенные между собой водонепроницаемой переборкой. В каждом из котельных помещений расположено по два котла, имеющие каждый по четыре топки с нефтяным отоплением и искусственной тягой. Поверхность нагрева котлов — 540 м². Нормальная паропроизводительность котлов составляет 55 т/ч при давлении 25,5 ат, максимальная — 68 т/ч при давлении 31,5 ат. Температура перегрева пара 370°С.

Машинное отделение по высоте разделено на две части: в верхнем помещении установлены главные турбогенераторы, возбудители, пульт управления, главный распределительный щит постоянного тока и вспомогательные турбодинамо; в нижнем помещении — главные паровые конденсаторы, циркуляционные и другие насосы, а также два главных электродвигателя, непосредственно соединенные с гребными валами. Винты — трехлопастные диаметром около 3,6 м.

Вес всей машинно-котельной установки турбоэлектрохода составляет около 110 кг/л. с. Вес гребного электрооборудования, включая пульт управления и возбудители, около 11,5 кг/л. с. Для сравнения укажем, что вес гребного электрооборудования на товаро-пассажирском судне «President Hoover» составляет 12,2 кг/л. с. На линкоре «New-Mexico» — 14 кг/л. с.

Главные генераторные агрегаты. Главная машинная установка турбоэлектроходов состоит из двух турбогенераторов. Турбины — изготовления завода Stork активно-реактивного типа и рассчитаны на рабочее давление пара 27 кг/см² с перегревом пара 360°С, вакуумом 96% и при температуре охлаждающей воды 17°. Имеются три ступени отбора пара. Нормальная мощность турбины 5 000 л. с. при 2 400 об/мин, 6 000 л. с. при 3 150 об/мин и максимальная мощность — 7 200 л. с. при 3 250 об/мин.

Характерной особенностью конструкции турбины является соединение упорного кольца турбины с механизмом, регулирующим зазор ротора турбины. Этим устройством обеспечивается надежная работа турбины при реверсах и высокий к. п. д. путем сдвига ротора турбины при длительных режимах.

Регулирование турбины возможно с центрального пульта управления в пределах от 600 до 3 150 оборотов. Имеется также аварийный регулятор, выключающий турбину при превышении скорости на 10—12%; он работает непосредственно от вала турбины. Дополнительно к этим регуляторам предусмотрено предохранительное

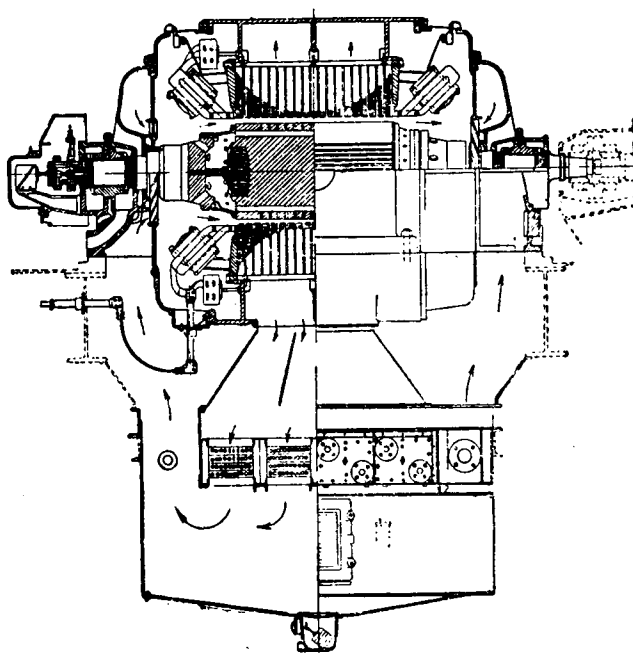


Рис. 3. Разрез турбогенератора.

устройство, выключающее турбину при падении вакуума. Максимальные габариты турбины следующие: длина — 4,400, ширина — 2 350 и высота — 2 250 мм.

Турбина непосредственно соединена с генератором трехфазного тока завода ASEA. Генератор имеет эластичное содинение с турбиной и отдельный фундамент. Турбогенераторы — двухполюсные, трехфазные, со встроенными вентиляторами, вентиляционной системой закрытого типа и воздухоохладителями, расположенными непосредственно под генераторами. На рис. 3 показан продольный разрез генератора с воздухоохладителями и тахогенератором.

Турбогенераторы имеют две номинальные мощности — для максимальной скорости и для экономической скорости. При максимальной скорости каждый генератор работает на один гребной двигатель, а при нормальной скорости на два двигателя. Номинальная мощность турбогенератора приведена в табл. 1.

Таблица 1

Номинальные мощности турбогенератора

Скорость, об/мин	Мощность, кВт	Частота, Hz	Напряжение, V	Ток, А	к. п. д. %	cos φ
3 150	4 500	52,5	3 150	825	96,85	1
2 400	3 600	40,0	2 400	865	97,25	1

Генератор имеет три вывода в нижней части статора со стороны колец. Нулевые концы фаз соединены под концевыми щитами и изолированы от земли на полное напряжение.

Ротор — типа с параллельными пазами. Конструкция ротора обеспечивает критическую скорость значительно выше максимальной рабочей скорости. Межвитковая изоляция обмотки ротора — лента из оксидированного алюминия, кор-

пусная — чистая слюда с небольшим количеством связующих лаков.

Подшипники щитового типа с принудительной смазкой. Охлаждение воздуха в системе производится трубчатыми воздухоохладителями, питаемыми заборной водой.

Для контроля нагрева отдельных частей генератора установлены температурные детекторы: три в пазах статора, два в нижних половинках вкладыша подшипника, два в струе входящего и выходящего воздуха.

В целях защиты от пожара каждый турбогенератор имеет устройство для автоматического пуска углекислоты в вентиляционную систему. В воздушной камере углекислота смешивается с циркулирующим воздухом и быстро расходится по всем частям вентиляционной системы. Автоматический пуск углекислоты производится любым из шести реле, помещенных на обмотке статора, по три с каждой стороны машины.

Для поддержания изоляции в хорошем состоянии и воспрепятствования отсырению в период бездействия генератора в корпусе каждого генератора имеются электрические грелки. Мощность грелок рассчитана таким образом, чтобы поддержать температуру внутри генератора на 5° выше окружающей температуры. Максимальные габариты генератора следующие: длина — 4 235, ширина — 2 700, диаметр — 2 200 мм. Вес — 23 т и маховой момент ротора — 10 т/м².

Генераторы получают возбуждение от специальных преобразователей, состоящих из электродвигателя длительной мощностью в 23,5 кВт при полутораминутной мощности 92,5 кВт и генератора длительной мощностью — 20 кВт при полутораминутной мощности 83 кВт. Всего имеется три преобразователя — по одному на каждый турбогенератор и один резервный.

Гребные электродвигатели. В машинном помещении, ближе к корме, расположены два гребных электродвигателя. Гребные электродвигатели с закрытой системой вентиляции — трехфазные, синхронные, с 28 полюсами. Воздухоохладители и электровентиляторы смонтированы в статоре.

На рис. 4 изображен разрез двигателя. Номинальные мощности двигателя приведены в табл. 2.

Таблица 2

Номинальные мощности двигателя

Скорость, об/мин	Мощность, кВт	Частота, зН	Напряжение, В	Ток, А	К. п. д. %	с : s φ
225	4 350	52,5	3 150	825	97,45	1
171	1 740	40,0	2 400	433	96,14	1

Характерной особенностью выполненных электродвигателей является выполнение корпуса и концевых щитов сварной конструкции. При таком исполнении достигаются большая жесткость и прочность конструкции при одновременной экономии в металле. Вес каждого электродвигателя в собранном виде составляет 42 т.

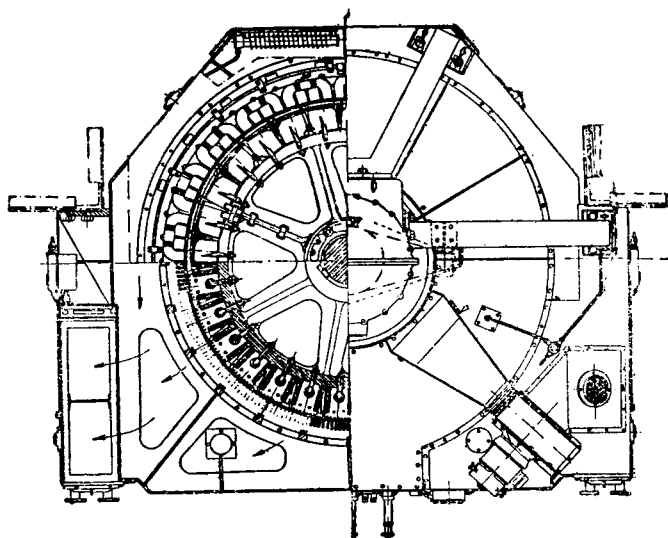


Рис. 4. Разрез двигателя с воздухоохладителями.

Опорные подшипники смонтированы в концевых щитах двигателей. Масло подается к шейке вала посредством диска, который вращается с валом.

Обмотка статора — шаблонная и укрепленна в пазах фибровыми клиньями, изоляция класса В. Сердцевина, спицы и кольцо для полюсов ротора — литые. Полюсы сборные из штампованной, лакированной листовой стали. Обмотка полюсов состоит из медных лент, намотанных узкой стороной в один слой. Для обеспечения вращающего момента при пуске в маневровых режимах в полюсных башмаках предусмотрена демпферная обмотка.

Вентиляционная система — закрытого типа и состоит из четырех воздухоохладителей, помещенных в корпусе статора, по два с каждой стороны. Циркуляция воздуха обеспечивается четырьмя электрическими вентиляторами — по одному на каждый воздухоохладитель.

Максимальные габаритные размеры гребных двигателей следующие: длина — 3 105 мм, ширина — 4 450 мм, высота — 3 600 мм. Вес — 42 т, маховой момент ротора — 63 т/м². Питание возбуждения гребных двигателей производится от судовой сети.

Пульт и схема управления. Управление гребной установкой производится из машинного отделения при связи с мостиком при помощи машинного телеграфа.

Вся аппаратура контроля управления и сигнализации сосредоточена в пульте управления. Пульт внутри разделен на две части. В передней его части расположена низковольтная аппаратура, позади в трех отдельных ячейках, находятся высоковольтные разъединители и переключатели.

Управление каждым из двух гребных двигателей осуществляется пятью штурвалами, симметрично расположенными на лицевой стороне пульта управления: штурвал пуска возбуждителя, для регулировки возбуждения генератора, для последовательного включения возбуждения генераторов и двигателей, для регулирования скоро-

Таблица 3

Режим работы установки	Число оборотов гребного двигателя	Частота, Hz	Мощность, kW	Напряжение, V	Ток, A	Ток возбуждения генератора, A	Ток возбуждения двигателя, A	Угол внутреннего сдвига	Момент на валу двигателя, t/m
Экономический ход 1 генератор работает на два двигателя. Скорость судна — около 16 узлов	172	40,0	3 760	2 450	890	160	120	48(44)	20,5
Каждый генератор работает на свой гребной двигатель. Скорость судна — около 20 узлов	225	52,5	4 400	2 990	830	140	120	61(55)	18,6

сти турбины и штурвал переключения фаз двигателя. Штурвалы механически заблокированы для обеспечения правильности манипуляций.

Для увеличения вращающего момента двигателя и облегчения работы демпферной обмотки при пусках и реверсах турбогенераторы работают всегда со скоростью 600 об/мин. Гребные электродвигатели пускаются, как индукционные, при этом обмотки возбуждения генераторов перевозбуждаются, и электродвигатели доводятся почти до синхронизма. После этого электродвигателям дается возбуждение, они втягиваются в синхронизм и работают, как синхронные двигатели. Возбуждение генераторов снижается после этого до нормального. При реверсах прежде всего понижают скорость турбины до 600 об/мин, после чего снимают возбуждение с двигателей и генераторов, затем переключают электродвигатели на обратный ход. Схема имеет балансную защиту и защиту против длительного перевозбуждения генераторов.

Испытание турбоэлектроходов. Испытания турбоэлектроходов производились в швартовом и ходовом режимах.

Во время испытаний на швартовах, т. е. при неподвижном судне, проводились длительные тепловые режимы для различных случаев нагрузки машины. При этом нагрев обмоток, подшипников и других частей машины не превосходил допустимых норм. Кроме длительных режимов на швартовах, был произведен ряд быстро следующих друг за другом реверсов с целью установления нагрева демпферной обмотки. Реверсы производились при работе одного генератора на один или на два двигателя. После 20 реверсов, продолжительностью каждый около 15 сек, и паузы в 30 сек нагрев демпферной обмотки составил только 3—9°. Реверсы производились при 600 оборотах турбины. Кроме того, была проверена работа температурной сигнализации, реле выхода из синхронизма, балансного реле и т. д.

Ходовые испытания турбоэлектроходов производились в Балтийском море.

Результаты испытаний в длительных режимах сведены в табл. 3. Отклонение полученных значений от номинальных расчетных величин не превышает 4—5%. Температура обмоток и частей машин не превышала допустимых норм нагрева.

Вычисленные значения угла внутреннего сдвига между полюсной системой турбогенератора и полюсной системой гребного двигателя показывают, что достаточная устойчивая работа машин обеспечена во всех режимах работы. В таблице приведены два значения этого угла: первое определено из диаграммы Потье, а второе (с учетом теории двух реакций) — по выражению для нормального момента. Одновременно нужно отметить высокое значение к. п. д. электрических машин как в режиме работы каждого генератора на свой двигатель, так и в режиме экономического хода. Последнее не имеет места при турбозубчатых установках, так как в экономическом ходу должны работать две турбины, будучи не полностью загруженными.

Для проверки продолжительности реверсов и поведения машин как со стороны величины пусковых токов, повышения напряжения на катушках и кольцах, нагрева демпферных обмоток, так и механических усилий был проведен ряд реверсов при 16- и при 20-узловом ходе.

Проверка реверсирования гребных двигателей в режиме работы одного генератора на два гребных двигателя была произведена с генератором правого борта. Испытания были начаты непосредственно после длительного хода при 16 узлах. В процессе реверса при помощи осциллографа фиксировался ток статора, токи возбуждения двигателя и генератора, число оборотов в минуту генератора и двигателя и самопишущими приборами — напряжение генератора. В течение получаса было произведено пять реверсов, последовательности их и результаты этого испытания приведены в табл. 4.

Таблица 4

реверса	Характер реверса	Скорость судна перед началом реверса, узлы	Время реверса, sec	Время до остановки судна, min
1	С полного переднего хода	16,5	100	3,75
2	С заднего хода	ок. 5,0	35	—
3	С полного переднего хода	16,5	105	3,75
4	С заднего хода	—	20	—
5	С переднего хода	7,0	25	1,0

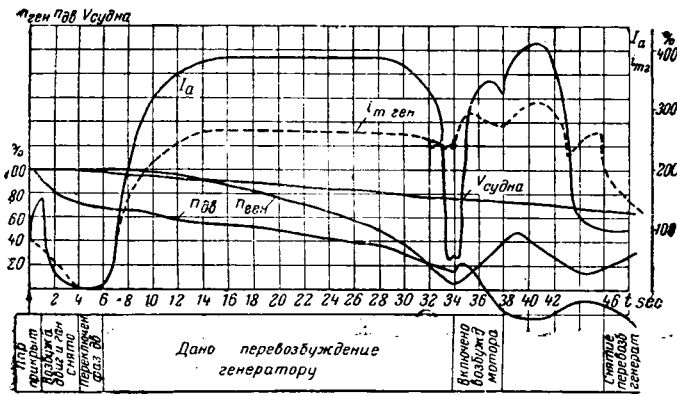


Рис. 5. Диаграмма реверса при 20-узловом ходе.

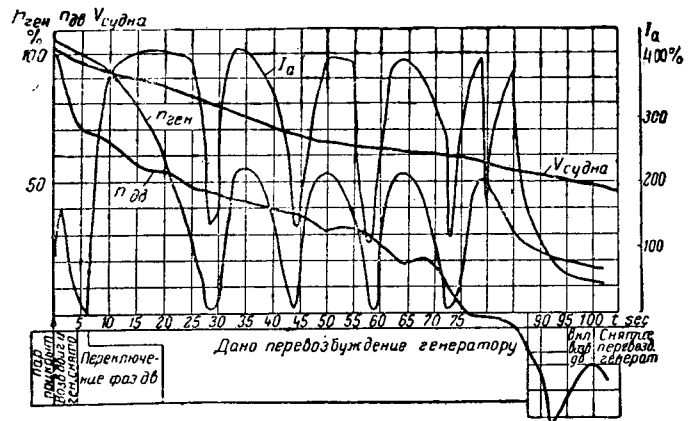


Рис. 6. Диаграмма реверса при 16-узловом ходе.

Проверка реверсирования при работе каждого генератора на свой двигатель была проведена после длительного хода судна при 20 узлах. Результаты представлены в табл. 5.

Таблица 5

№ реверса	Характер реверса	Скорость судна перед началом реверса, узлы	Время реверса, sec	Время до остановки судна, min
1	С переднего на задний	20	54	2,75
2	С заднего	—	35	1,0
3	С переднего	20	60	2,75
4	С заднего	7	18	1,0
5	С переднего	16,5	38	2,5

В период испытания был снят ряд осциллограмм реверсов при 20- и 16-узловом ходе. На рис. 5 и 6 даны результаты их обработки. По оси ординат рисунков отложены число оборотов винта генератора, ток винта (I_a), ток возбуждения (I_m), а по оси абсцисс — время, фиксируемое с момента прикрытия пара. На оси абсцисс также зафиксированы моменты включения возбуждения двигателей и генераторов, переключения фаз, включения возбуждения генераторов, включения возбуждения двигателя и снятия возбуждения с генераторов.

При реверсировании гребной установки характер изменения момента сопротивления имеет вид кривой Робинсона, приведенной на рис. 7. Кривая показывает, что при изменении направления вращения винта (при ходе судна вперед) возникают отрицательные моменты вращения перед переходом числа оборотов через нулевое значение. Величина максимума отрицательного момента зависит от ряда причин — скорости, формы корпуса и т. п., и колеблется в пределах от 0,5 до 1,2 момента вращения, соответствующего полному ходу вперед. Причина этого заключается в том, что винт под действием набегающих струй воды превращается в турбину, используя кинетическую энергию судна.

В период реверса двигатель работает в асинхронном режиме, и если реверс производить при нормальных частоте и напряжении, то

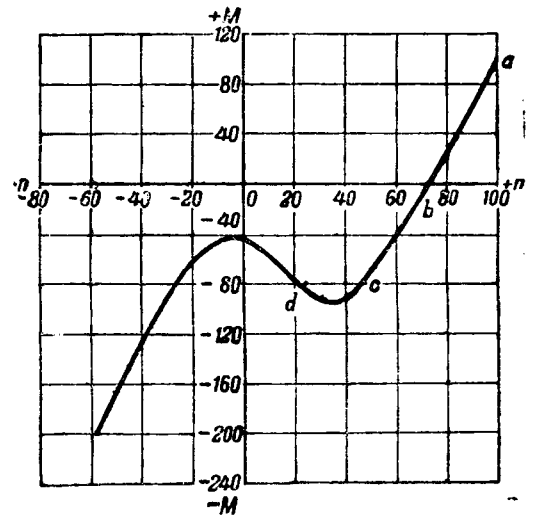


Рис. 7. Момент сопротивления при реверсах.

вращающий момент после реверсирования был бы недостаточным для преодоления отрицательного момента со стороны винта. Поэтому процесс реверса производится при пониженной частоте питающей сети и повышенном возбуждении генератора и тем самым передвигается максимум момента и повышается его величина.

Опыты по реверсам турбоэлектроходов дают следующую картину (рис. 5) .

За первые пять секунд скорость вращения двигателя снижается до 70% первоначальной скорости и замедление составляет при этом 0,233 об/сек². Ток в это время равен нулю, и поэтому очевидно, что торможение происходит за счет тормозного момента винта на участке кривой $a-b$ (рис. 7). Далее винт работает некоторое время при оборотах около 60—70% (точка c) так как тормозной момент со стороны двигателя еще не приложен. Затем наступает торможение со стороны двигателя. Двигателю при этом приходится преодолевать не только инерционные моменты, но и отрицательные моменты вращения со стороны винта, поэтому замедление на участке примерно от 52 до 33% ($c-b$) падает до 0,0564 об/сек². В дальнейшем

отрицательный момент вращения винта начинает падать и ускорение увеличивается, достигая 0,1 об/сек². После этого происходит разгон двигателя в обратном направлении.

Влияние характера кривой момента вращения винта особенно сказывалось при реверсе двух двигателей от одного генератора. В этом случае имело место неоднократное падение числа оборотов турбины до нуля, и так как этому соответствовало падение момента двигателя, то обороты винта снова повышались. Такое падение оборотов турбины явилось следствием того, что кинетическая энергия роторов турбины и генератора, за счет которой и происходит в первый момент торможение двигателя (так как пар прикрыт), расходуется значительно скорее, чем успевают сработать автоматические регуляторы подачи пара в турбину.

Произведенные при испытаниях наблюдения показали, что клапаны турбины вступают в действие только спустя 35—40 sec. с момента начала реверса. В этом случае надо преодолеть момент инерции двух двигателей, и, естественно, этого времени недостаточно для их торможения. Только наличием быстродействующих регуляторов турбины это явление можно было бы устранить.

Что касается характера протекания тока статора и ротора в период пуска, то, как видно из приведенных кривых, максимальное значение тока статора составляет около 380%, максимальное значение тока возбуждения — 260%. Одновременно нужно отметить, что в период реверса скольжение длительно составляет 150—160%.

Кривые падения скорости судна показывают, что скорость судна за время реверса при 20-узловом ходе снизилась на 35% и достигла

нуля через 2 min., 45 sec., что соответствует пройденному пути около 620 м; при 16-узловом ходе за время реверса скорость судна упала на 45% и достигла нуля через 3 min. 40 sec., что соответствует пройденному пути около 640 м. Таким образом наиболее эффективное торможение судна, как и следовало ожидать, имеет место при работе двух турбогенераторов.

Эксплуатация судов показала весьма высокие маневренные качества электрического привода винтов и возможность производства любого потребного количества реверсов.

Заключение. Необходимо отметить следующие преимущества электрификации гребного привода.

Наличие электрического привода винтов позволяет во время экономического хода работать только одной турбиной при полной ее загрузке и высоком значении к. п. д. всей установки. *Повышается надежность установки.* Так, выход из строя 50% генераторной мощности снижает скорость только на 20%. Облегчаются условия ремонтных работ. Отсутствие у турбины элементов заднего хода и редуктора *упрощает ее конструкцию, повышает к. п. д., уменьшает габариты* и снижает расход смазочного масла. Одновременно увеличивается использование площади машинного отделения, так как гребные двигатели могут быть установлены независимо от места установки генераторов. Несколько более высокая первоначальная стоимость вполне окупается в процессе эксплуатации.

Имеющийся опыт нашей электропромышленности вполне достаточен для создания всего электромашинного оборудования, необходимого при электрификации гребного привода морских судов.



Устойчивость электрических систем при перегрузках

Доктор техн. наук, проф. П. С. ЖДАНОВ
и кандидат техн. наук, доц. В. А. ВЕНИКОВ

Московский энергетический институт им. Молотва

Нарушения устойчивости, происходящие в связи с изменениями или перераспределениями нагрузок в электрической системе, например, при отключении части нагрузок или генераторов, имеют некоторые особенности сравнительно с известными процессами при коротких замыканиях.

Поведение электрических станций и систем при изменении потоков мощности в первую очередь определяется тем, насколько тесно связаны между собой системы (или станция и система). Станция, тесно связанная с системой, т. е. посылающая большую часть мощности в линию, приведенное реактивное сопротивление которой меньше синхронного реактивного сопротивления генераторов станции или соизмеримо с ним $[X_a \leq (2 \div 3)X_d]$, обычно сохраняет динамическую устойчивость даже при значительных величинах скачка мощности.

Однако, если потоки мощности возросли слишком сильно, то после затухания свободных токов новый стационарный режим может оказаться статически неустойчивым и система после длительного (до 20—30 сек) цикла колебаний может выйти из синхронизма.

Станция, слабо связанная с системой, т. е. отдающая большую часть своей мощности в местную сеть и только небольшую часть своей мощности передающая по линии (имеющей при-

Изложены принципы расчета устойчивости электрических систем при перегрузках, вызванных внезапным изменением или перераспределением мощности, и приводятся результаты расчетов, характеризующих протекание процессов в системах с слабыми и сильными связями.

веденное сопротивление много больше синхронного сопротивления генераторов станции), может оказаться динамически неустойчивой, выйдя из синхронизма в первом цикле качаний; время выхода здесь невелико, порядка 0,8—2 сек.

Применение обычного метода последовательных интервалов для расчета процессов, происходящих при скачках мощности в системах с сильными связями, оказывается практически затруднительным, так как в силу длительности процессов, требуется очень большое число интервалов.

Представленная на рис. 1 зависимость изменения во времени э. д. с. E_d , электрической мощности $P_{эл}$ и угла δ является характерной при скачках мощности в системах с сильной связью. Зависимость $P_{эл}$ от угла δ приведена на рис. 2. Как видно из этих рисунков, в цикле происходящих качаний электрическая мощность $P_{эл}$ периодически становится равной механической мощности $P_{мех}$ (точки a_1, a_2 и т. д.). Если при анализе поведения системы исходить именно из этих точек и соответственно значениям мощности в них определять угол δ , скорость $\frac{d\delta}{dt}$ и $E_d = f(t, \delta, \frac{d\delta}{dt})$, то, соединяя кривыми точки, аналогичные точкам a_1, a_2, \dots , можно получить

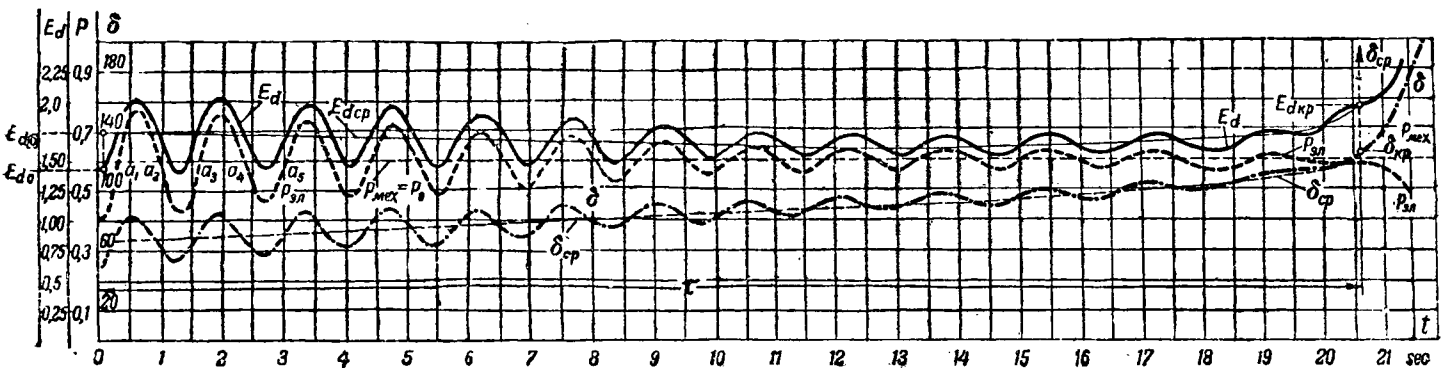


Рис. 1. Характер процессов при перегрузке электрической системы с сильной связью.
— время выпадения из синхронизма.

некоторые характеристики, дающие средние значения δ_{cp} , $\left(\frac{d\delta}{dt}\right)_{cp}$, E_{dcp} . Значения переменных, определяемые из этих характеристик, совпадают с истинными значениями, имеющими место при качаниях, только в моменты времени, когда $P_{эл} = P_{мех}$.

Зависимость $\delta_{cp} = f(t)$, не отражающая качания ротора генератора, несмотря на ее условность, представляет значительный интерес, характеризуя среднее движение системы и показывая начало выхода ее из синхронизма.

Применение метода последовательных интервалов при пользовании средними значениями сильно облегчается, так как величины интервалов в силу монотонного изменения этих значений могут быть взяты весьма большими (до 1—2 sec. вместо 0,05 sec.) и число интервалов благодаря этому значительно сокращено.

При расчете по средним значениям механическая инерция, определяющая период и амплитуду качания $\delta = f(t)$, не входит в расчетные выражения, что показывает отсутствие влияния ее на зависимость $\delta_{cp} = f(t)$ и на время выпадения системы из синхронизма.

Время выпадения из синхронизма, как это следует и из физических соображений, определяется, таким образом, исключительно временем затухания свободных токов в обмотке возбуждения, т. е. определяется только электромагнитной инерцией генератора. Поскольку этот генератор рассматривается теперь, как не имеющий механической инерции, ротор его без качаний переходит из одного положения в другое, соответственно изменениям тока в обмотке возбуждения.

В простейшем случае работы станции на шины бесконечной мощности введение средних значений еще сильнее упрощает задачу, позволяя определить время выпадения из синхронизма без применения последовательных интервалов — путем непосредственного интегрирования¹.

В этом случае имеем².

$$\sin \delta = \frac{P_0 X_d}{E_d U} \text{ и } \frac{d\delta}{dt} = - \frac{P_0 X_d}{U E_d^3} \cdot \frac{dE_d}{dt} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{P_0 X_d}{E_d U}\right)^2}}$$

Подстановка этих значений в уравнение для э. д. с. [Л. 1, стр. 165].

$$E_{de} = E_d + T_0 \frac{X'_d}{X_d} \frac{dE_d}{dt} - \frac{(X_d - X'_d)}{X_d} T_0 U \sin \delta \frac{d\delta}{dt} \quad (1)$$

даёт:

$$E_d = E_{de} - \left(\frac{X'_d}{X_d} + \frac{(X_d - X'_d) P_0^2 X_d}{E_d^2 U^3 - P_0^2 X_d^2} \right) \frac{dE_d}{dt} \quad (2)$$

где $\tau = \frac{t}{T_0}$. Уравнение (2) содержит только две

¹ На возможность такого интегрирования впервые указано С. А. Лебедевым (применительно к синхронным двигателям).

² Ниже индекс «ср» в целях упрощения опущен.

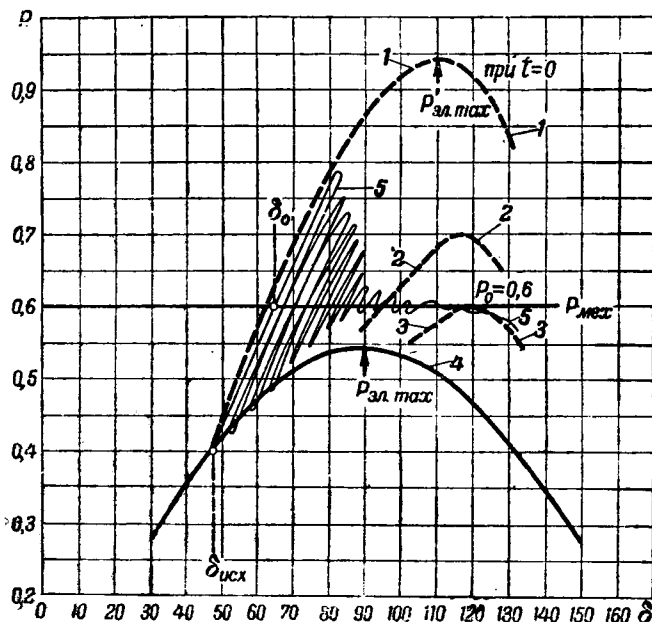


Рис. 2. Характеристики мощности при $E'_d = \text{const}$, $E_d = \text{const}$ и $E_d = \text{var} = f(t)$.

Кривая 1— $P_{эл}$ при $E'_d = \text{const} = E'_{dc}$; кривая 2— $P_{эл}$ при $t = 7,3$ sec. при $E'_d = \text{const}$; кривая 3— $P_{эл}$ при $t = 23,5$ sec. при $E'_d = E'_d \text{ пред} = \text{const}$. Кривая 4— $P_{эл}$ при $E_{d0} = \text{const}$; кривая 5— $P_{эл}$ при $E_d = \text{var} = f(t)$.

переменные: E_d и τ . Время, прошедшее от момента скачка мощности, при котором значение E_d изменилось с E_{d0} на $E_{d(t)}$, до момента, когда E_d достигает какое-либо значение E_{dn} (например, критическое — E_{dkp} , соответствующее моменту выхода системы из синхронизма), находится из уравнения (2):

$$\tau = \int_{E_{d0}}^{E_{dkp}} \frac{X'_d}{X_d} \frac{dE_d}{E_{de} - E_d} + \int_{E_{d0}}^{E_{dkp}} \frac{E_{dkp}}{E_{de} - E_d} \cdot \frac{P_0^2 X_d}{U} \times \frac{dE_d}{\sqrt{E_d^3 - \left(\frac{P_0 X_d}{U}\right)^2}}$$

После интегрирования получается:

$$\tau = \frac{X'_d}{X_d} \ln \frac{E_{d(t)} - E_{d0}}{E_{dkp} - E_{d0}} + \frac{X_d - X'_d}{E_d^3} P_0 (\delta_0 - \delta_{kp}) + \frac{(X_d - X'_d) U}{X_d E_{d0}} (\cos \delta_{kp} - \cos \delta_0) + \frac{2(X_d - X'_d) P_0}{E_d^3 \sqrt{1 - k^2}} \left(\arctg \frac{\text{tg } \frac{\delta_{kp} - k}{2}}{\sqrt{1 - k^2}} - \arctg \frac{\text{tg } \frac{\delta_0 - k}{2}}{\sqrt{1 - k^2}} \right), \quad (3)$$

где $k = \frac{P_m}{P_0}$, $P_m = \frac{E_d U}{X_{12}}$, X_{12} — реактивное сопротивление связи (исходя из X_d).

Критическое значение $E_{dкр}$ определяется из следующих соображений: выпадение системы из синхронизма происходит при равенстве максимальной возможной электрической мощности (амплитуды угловой характеристики, построенной при $E'_{dкр} = \text{const}$) и механической мощности; при этом

$$\frac{dP_{эл}}{d\delta} = \frac{d}{d\delta} \left(\frac{E'_d U}{X'_d} \sin \delta - \frac{U^2 (X_d - X'_d)}{2X'_d X_d} \sin 2\delta \right) = 0,$$

откуда

$$E'_{dкр} = U \frac{X_d - X'_d}{X_d} \cdot \frac{\cos 2\delta_{кр}}{\cos \delta_{кр}},$$

после чего нетрудно найти и соответствующее значение $E_{dкр}$.

Значение $\delta_{кр}$ легко определяется, так как при принятых выше допущениях об отсутствии механической инерции ротора генератора, последний немедленно по достижении критического значения угла приобретает скорость $\frac{d\delta}{dt}$, равную бесконечности, на основании чего из уравнения (1) после замены E_d на $\frac{P_0 X_d}{U \sin \delta}$ и подстановки

$$\frac{dE_d}{dt} = - \frac{P_0 X_d \cos \delta}{U \sin^2 \delta} \frac{d\delta}{dt};$$

после преобразований получается:

$$- \frac{P_0 X'_d X_d}{U^2 (X_d - X'_d)} = \text{tg } \delta_{кр} \cdot \sin^2 \delta_{кр}, \quad (4)$$

откуда находится $\delta_{кр}$.

Расчет устойчивости системы, состоящей из двух *сильно связанных станций* конечной мощности, проводимый большими интервалами без учета механической инерции генераторов, основывается на приведенных ниже уравнениях (5), полностью характеризующих режим системы:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= k_1 E_{d1}^2 + k_{12} E_{d1} E_{d2} \sin \theta_1, \\ A_1 E'_{d1} &= a_{11} E_{d1} + k_{12} E_{d2} \cos \theta_1, \\ A_2 E'_{d2} &= a_{22} E_{d2} + k_{12} E_{d1} \cos \theta_2. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Здесь $k_1, k_{12}, a_{11}, a_{22}, A_1, A_2$ — постоянные коэффициенты, $\theta_1 = \delta - \alpha_{12}$; $\theta_2 = \delta + \alpha_{12}$.

Эти уравнения после преобразований, заключающихся в дифференцировании, замене $\frac{dE'_d}{dt}$ на $\frac{E_{d1} - E_1}{T_0}$ и последующем переходе к конечным разностям, дают возможность определить в каждом интервале времени

$$\frac{dE_{d1}}{dt} = \frac{\Delta_1}{\Delta}, \quad \frac{dE_{d2}}{dt} = \frac{\Delta_2}{\Delta}, \\ \frac{d\delta}{dt} = \frac{\Delta_3}{\Delta}.$$

Здесь Δ — определитель, составленный из коэффициентов преобразованных уравнений (5), а $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ — соответствующие миноры, определяемые для каждого (кроме первого) интервала в предположении, что E_{d1}, E_{d2} и δ — в дан-

ном интервале остались теми же, что и в предыдущем³.

Время выпадения из синхронизма генераторов системы, принятых безинерционными, определяется по условию

$$\frac{d\delta}{dt} = \infty.$$

Согласно этому условию интервал времени $\Delta t_{(выпад)}$, в котором наступает выпадение из синхронизма, характеризуется тем, что определитель Δ становится равным нулю. Уточнение момента выпадения из синхронизма в пределах этого интервала производится графическим построением $\Delta = f(t)$, для чего расчет продолжается в область $\Delta < 0$.

Указанный метод простых приближенных расчетов может быть применен и для более сложных систем [Л. 2].

При перегрузках систем *со слабыми связями* влияние свободных токов в обмотках возбуждения оказывается значительно меньшим и часто не может обеспечить сохранения устойчивости в первом цикле колебаний. Поведение системы может быть с достаточной для практики точностью рассчитано, исходя из постоянства э. д. с. за переходным сопротивлением генератора, при постоянстве мощности нагрузок, перенесенных в схеме замещения к $E'_d = \text{const}$. При таких допущениях основная расчетная схема, состоящая из двух станций конечной мощности и нагрузки, может быть сведена к простейшей схеме: станция — шины бесконечной мощности.

Уравнение относительного движения генераторов системы имеет вид:

$$M_2 \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_0 - P'_m \sin \delta, \quad \text{где } P'_m = \frac{E'_{d1} E'_{d2}}{X'_{12}}, \\ M_2 = \frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2}, \quad P_0 = \frac{M_2 P_{10} - M_1 P_{20}}{M_1 + M_2} \dots \frac{M_2 P_{1n} - M_1 P_{2n}}{M_1 + M_2},$$

X'_{12} — реактивное сопротивление связи (исходя из X'_d).

Несколько более сложные, но аналогичные соотношения получаются и при учете активного сопротивления передачи или при наличии в системе передачи промежуточных нагрузок.

Отключение генераторов второй станции (уменьшение P_{20}) или увеличение нагрузки (P_{2n}) или, наконец, уменьшение нагрузки (P_{1n}) одинаково сказывается на изменении P_0 , вызывая относительное ускорение первой станции.

Таким образом анализ поведения систем со слабыми связями при перегрузках, сбросах или набросах мощности сводится к элементарным расчетам в схеме: генератор — шины бесконечной мощности.

Применяя метод площадей, можно найти те предельные значения наброса мощности, при которых система еще обладает естественной

³ Допущение это не вносит заметных ошибок, поскольку расчет ведется по медленно изменяющимся средним значениям.

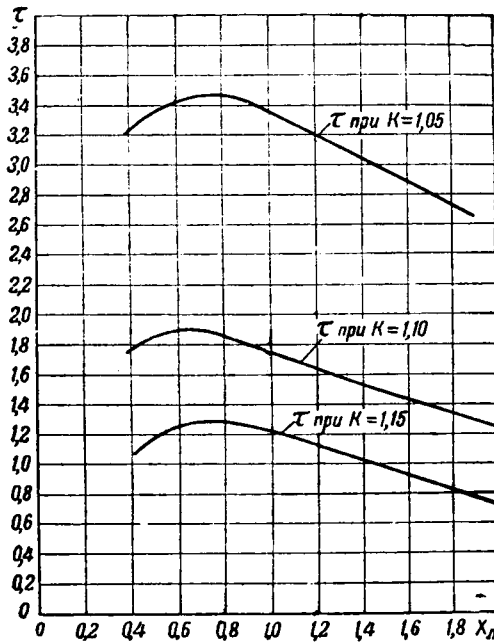


Рис. 3. Зависимость времени выпадения из синхронизма, выраженного в условных единицах $\tau = \frac{t}{T_0}$, от величины реактивного сопротивления линии.

устойчивостью, т. е. остается устойчивой без каких-либо отключений нагрузки. Тем же методом легко определить, какую часть нагрузки надо отключить для удержания в синхронизме системы, не обладающей естественной устойчивостью.

Значение предельного — критического угла $\delta_{кр}$, при котором должно быть произведено это отключение, определяется выражением::

$$\delta_{кр} = \frac{P'_m (\cos \delta_0 + \cos \delta''_0) 57,3 + [\delta_0 P'_0 - (180 - \delta''_0) P''_0]}{P'_0 - P''_0}, \quad (6)$$

где δ_0 — начальный угол; δ''_0 — угол после отключения нагрузки; P'_0 , P''_0 — значения P_0 до и после отключения части нагрузки.

При отключении нагрузки не сразу, а ступенями (например, в два приема), выражение (6) приобретает следующий вид:

$$\delta_{кр} = \frac{1}{P''_{0(1)} - P''_{0(2)}} [P'_m (\cos \delta_0 + \cos \delta''_0) 57,3 + P_{0(1)} \delta_{1(1)} - (180 - \delta''_0) P''_{0(2)} - P'_0 (\delta_{1(1)} - \delta_0)], \quad (7)$$

где $\delta_{1(1)}$ — угол при первом отключении, а $P_{0(1)}$ и $P''_{0(2)}$ — мощности нагрузки после первого и второго отключения.

Предельное время отключения нагрузки находится методом последовательных интервалов.

Расчеты, проведенные описанными выше методами, позволили установить некоторые характерные зависимости.

На рис. 3 представлено время выпадения из

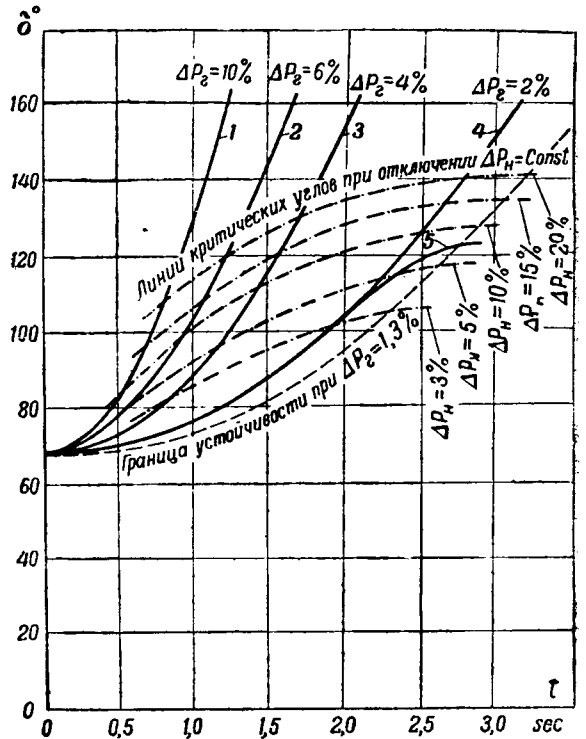


Рис. 4. Характер изменения относительного угла δ при перегрузке электрической системы, состоящей из двух станций конечной мощности, имеющих слабую связь. Кривые 1, 2, 3, 4 — $\delta = f(t)$ при отключении генераторной мощности ΔP_2 без отключения нагрузки; кривая 5 — $\delta = f(t)$ после отключения 3% нагрузки.

синхронизма в зависимости от величины реактивного сопротивления связи (X_n); зависимость эта получена для системы станция — шины бесконечной мощности для случая сильной связи. С увеличением X_n , т. е. с ослаблением связи, время выпадения заметно уменьшается. Уменьшение времени выпадения при очень сильной связи станции с системой ($X_n < 0,5$) объясняется уменьшением всплеска свободных токов, поскольку в этом случае скачок нагрузки в большей степени воспринимается системой бесконечной мощности.

Характер изменения угла δ в системе, состоящей из двух станций конечной мощности, имеющих слабую связь ($X_n = 10$), показан на рис. 4.

На том же рисунке приведены значения критических углов $\delta_{кр}$ и показан эффект отключения части нагрузки. Времена выпадения из синхронизма, как видно из кривых, получаются весьма малыми и только быстрое отключение части нагрузки может удержать систему в синхронизме.

Литература

1. С. А. Лебедев и П. С. Жданов. Устойчивость параллельной работы электрических систем. ОНТИ, 1934.
 2. П. С. Жданов и В. А. Веников. Исследование эффективности ограничения потоков мощности на линиях интерконнекции. Отчет кафедры, МЭИ, 1944.



Влагостойкость и водостойкость твердых выпрямителей

Кандидат техн. наук С. Б. ЮДИЦКИЙ и инж. С. Ю. НЕМЧИН

Всесоюзный электротехнический институт

Описаны исследования существующих типов твердых выпрямителей и способы повышения их влаго- и водостойкости посредством покрытия выпрямительных лаками АФ-71 и К-7 без ухудшения их электрических характеристик.

Влагостойкость твердого выпрямителя является одной из характеристик, определяющих надежность его работы в эксплуатационных условиях. Поэтому повышение ее имеет весьма существенное значение, поскольку в ряде случаев, например, при установке выпрямителей на кораблях, им приходится работать при влажности окружающего воздуха равной согласно нормам $95 \pm 3\%$.

Для определения степени влагостойкости и водостойкости различных типов твердых выпрямителей, не покрытых защитным лаком, селеновые выпрямительные элементы диаметром 45/6 мм и купроксные элементы диаметром 42/12 мм были помещены в эксикатор, на дно которого была налита вода для создания условий влажности, близкой к 100%.

Находившиеся в этих условиях в течение 1060 час. селеновые элементы и 672 час. куп-

роксные элементы подвергались систематическим измерениям, которые позволяли определять степень изменения их электрических характеристик. Во время опыта у каждого выпрямительного элемента измерялись напряжение в прямом направлении U_{np} при прямом токе в 0,5 А и обратное напряжение $U_{об}$ при обратном токе в 50 мА.

Полученные результаты изменения U_{np} и U в зависимости от времени воздействия влажного воздуха трех наиболее характерных купроксных и 10 селеновых элементов приведены на рис. 1.

Как следует из рис. 1, у купроксного элемента 1 после нахождения его в эксикаторе в течение 120 час. произошло короткое замыкание; у элемента же 2 за 672 часа лишь снизилось обратное напряжение (с 30 до 5,5 В). Отмеченные факты могут быть объяснены попаданием мельчайших капель воды в большей степени на первый и в меньшей на второй элемент.

Следует отметить, что у купроксных выпрямителей при падении капель воды на поверхность окиси меди CuO_2 (особенно у края пластины) во время прохождения тока в прямом направлении может происходить частичное или полное восстановление меди, в результате чего и получается резкое снижение обратного напряжения (электрической прочности), а иногда и пробой. При отсутствии капель воды на поверхности купроксного элемента последний под действием влажного воздуха начинает усиленно стареть, вследствие чего падение напряжения на нем в прямом и обратном направлении возрастает.

Как следует из кривой 3 того же рисунка, за 672 часа падение напряжения возросло с 1,35 до 1,8 В. Селеновые же выпрямители, как показали опыты, значительно более влагостойки, чем купроксные.

Кривые 4 изображают изменения среднего значения прямого и обратного напряжений для 10 исследованных селеновых выпрямительных элементов, обратное напряжение которых за 672 часа снизилось с 14 до 12 В и держалось на таком уровне до конца опыта еще в течение 384 час.

Одновременно было проведено исследование увелечения влагостойкости и водостойкости

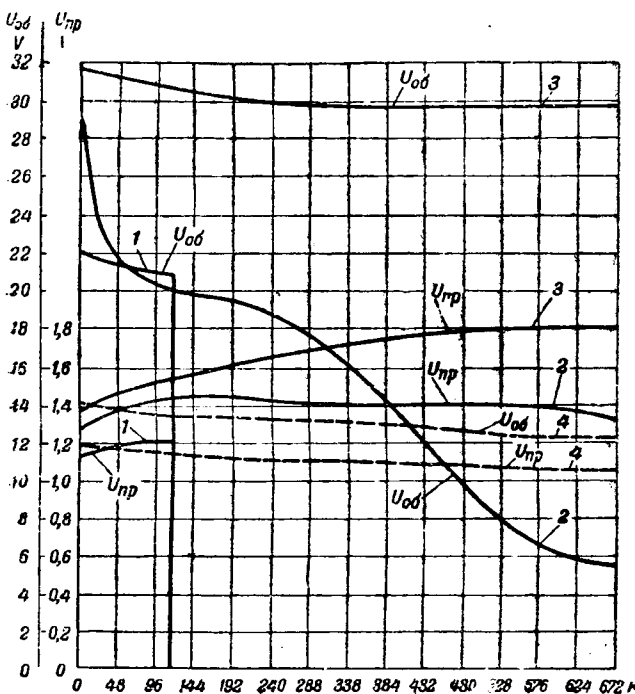


Рис. 1. Кривые изменения прямого U_{np} и обратного $U_{об}$ напряжений купроксных и селеновых выпрямителей при испытании их на влагостойкость.

1, 2, 3 — купроксные выпрямители; 4 — селеновые выпрямители

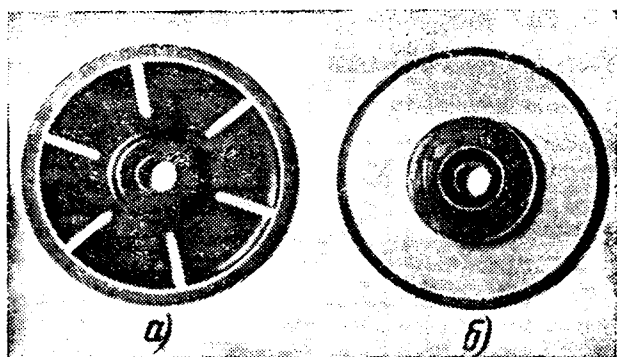


Рис. 2. Контактные шайбы селенового выпрямителя.

купроксных и селеновых выпрямителей посредством покрытия выпрямителей водостойкими лаками.

Лаки, применяемые для этих целей, кроме влагостойкости и водостойкости должны: а) обладать химической инертностью, т. е. химически не реагировать с элементами, входящими в состав выпрямителя, и б) быть воздушной сушки, т. е. высыхать при температуре, не превосходящей 50°C для купроксных выпрямителей и 75°C для селеновых выпрямителей. Сами же селеновые выпрямительные элементы, покрываемые водостойким лаком, должны иметь такую конструкцию контактных шайб, которая не позволяла бы лаку затекать между контактной шайбой и катодным сплавом.

Опыты по повышению влагостойкости посредством покрытия лаками были проведены с селеновыми выпрямителями с контактными шайбами в двух исполнениях: в виде пружинной контактной шайбы, имеющей форму диска с пружинящими лепестками (рис. 2а), и в виде центральной сплошной контактной шайбы (рис. 2б).

Следует отметить, что при пружинной шайбе получается весьма плотное прилегание лепестков к катодному сплаву, благодаря чему лак при определенной консистенции, как показал опыт, не затекает между ними и не нарушает электрического контакта.

Для создания же хорошего контакта сплошной шайбы, диаметр которой в целях улучшения охлаждения делается меньше диаметра выпрямительного элемента, приходится сильно сжимать выпрямительные столбики. Однако обратное сопротивление селенового выпрямителя при очень сильном давлении уменьшается; поэтому селен в центральной части диска дополнительно изолируется от катодного сплава лаком или другим изоляционным материалом. Подобная изоляция позволяет без опасения за пробой выпрямителя сильно сжимать выпрямительные столбики.

Для покрытия селеновых выпрямителей с целью увеличения их влаго- и водостойкости были исследованы следующие лаки: 1) хлорвинильный; 2) оксиформальдегидный; 3) асфальтовый; 4) анилиноформальдегидный; 5) анилидоформальдегидный; 6) нитроформальдегидный.

Наиболее хорошие результаты в отношении водостойкости и химической нейтральности были

получены при применении для покрытия селеновых и купроксных выпрямителей следующих разработанных ЦНИЛИЗ ВЭИ лаков: анилидоформальдегидного (АФ-71), нитроанилидоформальдегидного (НАФ-50) и анилиноформальдегидного (К-7).

1. Анилидоформальдегидный лак АФ-71 готовится на основе анилидоформальдегидной смолы № 8 с льняным маслом. Этот лак обладает следующими основными качествами: а) время сушки при 20°C — 14 h; б) теплостойкость при 105°C — 10 h; в) хорошие масло- и водостойкость; г) пробивной градиент 50 kV/cm ; д) удельное объемное сопротивление $10^{11}\ \Omega\text{ см}$.

2. Нитроанилидоформальдегидный лак НАФ-50 основан на анилидоформальдегидной смоле № 19 с добавлением нитроцеллюлозы. Благодаря введению нитроцеллюлозы лак НАФ-50 является наиболее быстросохнущим. Лак обладает следующими основными качествами: а) время сушки при 20°C — 20 min; б) теплостойкость при 105°C — 40 h; в) хорошие масло- и водостойкость; г) пробивной градиент — 80 kV/cm ; д) удельное объемное сопротивление $10^{13}\ \Omega/\text{см}$.

3. Анилиноформальдегидный лак К-7 получается из анилина и формальдегида и обладает следующими основными качествами: а) время сушки при 40°C — 1 h; б) обладает хорошей влагостойкостью; в) электрическая прочность 50 kV/cm ; г) удельное объемное сопротивление — $1,5 \cdot 10^7\ \Omega\text{ см}$.

Как указывалось выше, наиболее хорошие результаты в отношении повышения влагостойкости селеновых выпрямительных элементов получены при покрытии их анилидоформальдегидным лаком АФ-71 и анилиноформальдегидным лаком К-7. У элементов, покрытых лаком АФ-71, как видно на рис. 3, обратное напряжение и, следовательно, электрическая прочность выпрямителя при длительном нахождении его в атмосфере воздуха с влажностью, близкой к 100%, не уменьшилась. Имевшее место некоторое увеличение обратного напряжения можно объяснить доформовкой выпрямителя при замерах во время опытов. Несколько худшие результаты были получены при покрытии выпрямительных элементов

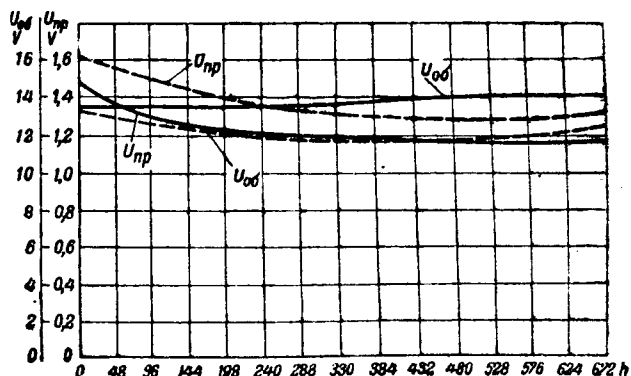


Рис. 3. Кривые изменения прямого $U_{пр}$ и обратного $U_{об}$ напряжений селеновых выпрямительных элементов, покрытых лаками.

— при лаке АФ-11, --- при лаке НАФ-50.

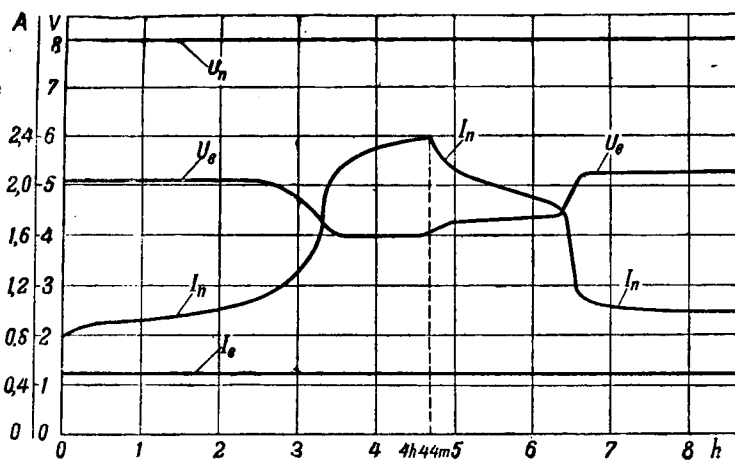


Рис. 4. Кривые изменения переменного и выпрямленного тока и напряжения селенового выпрямителя при работе его в воде.

нитроанилидоформальдегидным лаком НАФ-50. Как видно из того же рисунка, в этом случае обратное напряжение снизилось с 13,2 до 12,3 V; при покрытии элементов оксидофенольным лаком обратное напряжение снизилось несколько больше: с 13,5 до 12,2 V. Недостаточная степень защиты выпрямительных элементов лаком НАФ-50 может быть объяснена тем, что этот лак очень жидкий, и при одном покрытии получается очень тонкая пленка. Повышение защиты от влаги при использовании лака НАФ-50 может быть достигнуто нанесением на выпрямитель нескольких слоев этого лака.

Работа селеновых и купроксных выпрямителей в воде. При опытах исследуемые селеновые и купроксные выпрямители, собранные из 8 элементов и работавшие на активное сопротивление, погружались также на значительное время в воду.

В этих условиях работы выпрямителей выпрямленный ток I_s поддерживался постоянным замеру подвергались выпрямленное напряжение U_s , подводимое к выпрямителю напряжение переменного тока U_n и переменный ток I_n .

Как видно из рис. 4, на котором приведены данные испытания селенового выпрямителя на водостойкость при работе его в воде, за первые два часа работы переменный ток относительно мало возрос (с 0,8 до 1 А), выпрямленный же ток и напряжение оставались почти неизменными.

В дальнейшем вследствие значительного увеличения тока утечки наблюдался сильный рост

величины переменного тока. После 4 час. 44 мин. работы выпрямителя в воде этот ток достиг 2,36 А, т. е. увеличился почти в три раза относительно начального значения (до погружения выпрямителя в воду).

После работы выпрямителя в воде он был из нее вынут и оставлен для работы на воздухе.

Из того же рис. 4 видно, что селеновый выпрямитель, постепенно высыхая, приобретает вновь вентильные свойства, близкие к первоначальным.

Таким образом опыт показывает, что селеновые выпрямители в течение некоторого промежутка времени (около 2 час.) могут работать без повреждения даже в воде. Для повышения водостойкости селеновые и купроксные выпрямители были опять-таки покрыты лаками. Данные испытания подобного выпрямителя, покрытого двойным слоем анилидоформальдегидного лака АФ-71, при работе его в воде с перемежающейся нагрузкой показывают, что его водостойкость значительно повысилась. За 100 час. нахождения выпрямителя в воде его выпрямительные качества изменялись незначительно; при постоянной величине выпрямленного тока и напряжения подводимый переменный ток изменился лишь с 0,75 до 0,775 А, т. е. на 3,32%.

Такие же хорошие результаты по повышению водостойкости были получены при покрытии селеновых выпрямителей анилиноформальдегидным лаком К-7. Несколько худшие результаты дало покрытие выпрямителей нитроанилидоформальдегидным лаком НАФ-50.

Данные испытания купроксного выпрямителя, покрытого лаком АФ-71, при работе его в воде показывают, что водостойкость выпрямителя повысилась до такой степени, что он работал в воде в течение 50 час. без изменения его характеристики. При дальнейшей работе выпрямителя в воде переменный ток начал сильно возрастать и к 100 час. работы возрос с 0,5 до 1,7 А, т. е. в 3,4 раза.

Из сравнения данных опыта следует, что при покрытии селеновых и купроксных выпрямителей одним и тем же водостойким лаком АФ-71 более водостойким получается селеновый выпрямитель.

Те же данные позволяют прийти к выводу, что посредством покрытия селеновых и купроксных выпрямителей лаками АФ-71 и К-7 можно значительно повысить их влагостойкость и водостойкость без ухудшения электрических характеристик выпрямителей.



Расчет фигурных реостатов

Кандидат техн. наук, доц. Е. И. ДМИТРИЕВ

Институт машиноведения Академии наук СССР

Фигурные реостаты с ленточным каркасом используются на практике так же, как и обыкновенные реостаты типа Рустрата. Скользящий движок их перемещается вдоль оси каркаса (по оси абсцисс, рис. 1), вследствие чего происходит *ступенчатое* (скачкообразное) изменение сопротивления.

Минимальный скачок в изменении сопротивления соответствует сопротивлению одного витка. Для придания компактности ленточному фигурному реостату можно осуществить конструкцию его по типу проволочных радиосопротивлений, скользящий движок которых вращается посредством лимба вокруг оси.

Однако не всегда бывает допустимо ступенчатое изменение функционального сопротивления. *Плавное* изменение сопротивления достигается при помощи вращающегося фигурного реостата, схематичное устройство которого показано на рис. 2. Изменение сопротивления производится здесь вращением каркаса вокруг оси; при этом движок реостата скользит по одному из витков его и одновременно перемещается вдоль оси винтовой линии обмотки реостата. Одному полному обороту каркаса должно соответствовать перемещение скользящего движка вдоль оси на один виток.

Ориентировочно можно предполагать, что изготовление и эксплуатация вращающихся фи-

С развитием счетно-решающих машин и аппаратов, всевозможных устройств автоматического управления, регулирования и контроля, электрического моделирования физических процессов, артиллерийских и авиационных прицельных устройств и пр. значительно расширилась область применения фигурных (функциональных) реостатов, сопротивление которых изменяется по определенному закону.

В статье дан анализ функциональных сопротивлений, позволяющий определить форму фигурных реостатов по заданному закону изменения сопротивления; изложена методология расчета таких реостатов.

гурных реостатов будут несколько сложнее, чем ленточных. Следовательно, оба типа фигурных реостатов имеют свои достоинства и недостатки — на практике они будут дополнять, а не исключать друг друга.

Очевидно, функциональные сопротивления, какими являются фигурные реостаты, требуют применения каркасов специальной формы либо в виде фигурных пластин, либо в виде фигурных тел вращения. Цель данной работы заключается в определении формы ленточных (плоских) и вращающихся фигурных реостатов для заданного закона изменения сопротивления вдоль их длины.

При расчете фигурных реостатов нами приняты следующие обозначения:

- L — полная длина реостата в мм;
- x — часть длины реостата от начала до скользящего движка в мм;
- y — текущее значение высоты ленточного каркаса или радиуса тела вращения в м;
- a — толщина ленточного каркаса в м;
- R — текущее значение сопротивления реостата в Ω ;
- R_0 — сопротивление, определяемое из начальных условий, в Ω ;
- d — диаметр проволоки в мм;

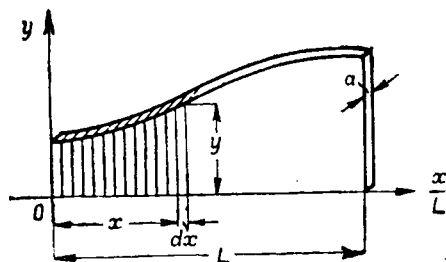


Рис. 1. Фигурный реостат с ленточным каркасом.

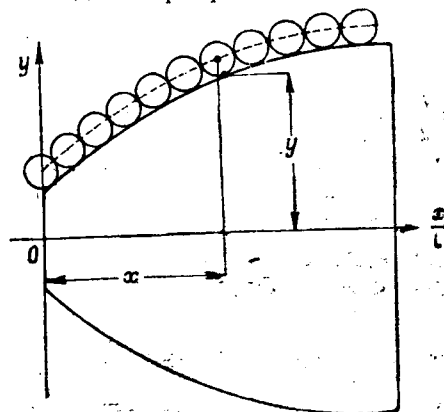


Рис. 2. Фигурный реостат с вращающимся каркасом.

№ по пор.	$R = R_0 \cdot f\left(\frac{x}{L}\right)$	$y = f\left(\frac{x}{L}\right)$	Выбор величины y из начальных условий, m	Определение величины R_0 , Ω
	1	2	3	4
1	$R = R_0 \cdot \sin\left(\frac{x}{L}\right)$	$y = \frac{d^3 R_0}{8 \rho L} \cdot \cos\left(\frac{x}{L}\right) = \frac{d^3 \cdot R_0}{8 \rho \cdot N} \cdot \cos\left(\frac{x}{L}\right)$	$y_{x=0} = \frac{d^3 \cdot R_0}{8 \rho N} = 0,05$	$R_0 = \frac{y_{x=0} \cdot 8 \rho N}{d^3} = \frac{0,05 \cdot 8 \cdot 0,43 \cdot 1500}{4 \cdot 10^{-3}} = 6450$
2	$R = R_0 \cdot \lg\left(\frac{x}{L}\right)$	$y = \frac{d^3 \cdot R_0}{8 \rho L} \cdot \frac{1}{\left(\frac{x}{L}\right)}$	$y_{x=L} = 0,05$	$R_0 = \frac{0,005 \cdot 8 \cdot 0,43 \cdot 300}{8 \cdot 10^{-3}} = 645$
3	$R = R_0 \cdot e^{\frac{x}{L}}$	$y = \frac{d^3 R_0}{8 \rho \cdot L} \cdot e^{\frac{x}{L}}$	$y_{x=0} = 0,01$	$R_0 = 1290$
4	$R = R_0 \cdot \left(\frac{x}{L}\right)^m$	$y = \frac{d^3 \cdot R_0}{8 \rho L} \cdot m \left(\frac{x}{L}\right)^{m-1}$	$y_{x=L} = \frac{d^3 R_0}{8 \rho L} \cdot m = 0,05$	$R_0 = \frac{6450}{m}$
5	$R = R_0 \cdot \arcsin\left(\frac{x}{L}\right)$	$y = \frac{d^3 R_0}{8 \rho L} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{x}{L}\right)^2}}$	$y_{x=0} = 0,01$	$R_0 = 1290$

s — поперечное сечение проволоки в mm^2 ;

ρ — удельное сопротивление проволоки в $\Omega \text{mm}^2/\text{m}$;

n — число витков на 1 mm длины реостата;

$N = nL = \frac{L}{d}$ — полное число витков на цилиндрическом каркасе реостата при идеальной плотной намотке (виток к витку).

Для принятых здесь обозначений поставленную задачу можно сформулировать следующим образом.

Требуется определить зависимость $y = f\left(\frac{x}{L}\right)$ для заданного закона изменения сопротивления

$$R = R_0 \cdot f\left(\frac{x}{L}\right) \quad (I)$$

Фигурный ленточный реостат. Допустим, что от положения x (рис. 1) движок реостата переместился на расстояние dx , тогда сопротивление R получит приращение

$$dR = \rho \frac{2(y+a)ndx}{s},$$

где ndx — число витков на длине dx .

После разделения переменных, получим:

$$\frac{dR}{dx} = \frac{2\rho n}{s} y + \frac{2\rho n}{s} a = R_0 \varphi'\left(\frac{x}{L}\right)$$

или

$$y = \frac{s}{2\rho n} R_0 \varphi'\left(\frac{x}{L}\right) - a.$$

Но $\frac{1}{n} = d$, поэтому

$$y = \frac{sd}{2\rho} R_0 \varphi'\left(\frac{x}{L}\right) - a. \quad (II)$$

Текущие значения y при $R \Omega$	0	0,01	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	1,0
$y = 50 \cdot \cos\left(\frac{x}{L}\right) =$ $R = 6450 \cdot \sin\frac{x}{L} =$	50	—	—	48,5	46,1	41,25	34,84	—	27,02
$y = \frac{5}{\left(\frac{x}{L}\right)} =$ $R = 645 \cdot \lg\left(\frac{x}{L}\right) =$	∞	500	50	25	12,5	$8\frac{1}{3}$	6,25	—	5
$y = 10 \cdot e^{\frac{x}{L}} =$ $R = 1290 \cdot e^{\frac{x}{L}} =$	10	—	—	12,2	14,9	18,2	22,3	—	27,2
$y = 50 \cdot \left(\frac{x}{L}\right)^{m-1} =$ $R = \frac{6450}{m} \cdot \left(\frac{x}{L}\right)^m =$	0	—	—	2	8	18	32	—	50
$y = \frac{10}{\sqrt{1-\left(\frac{x}{L}\right)^2}} =$ $R = 1290 \cdot \arcsin\left(\frac{x}{L}\right) =$	0	—	—	17,2	137,6	464	1100,8	—	2150
$y = \frac{10}{\sqrt{1-\left(\frac{x}{L}\right)^2}} =$ $R = 1290 \cdot \arcsin\left(\frac{x}{L}\right) =$	10	—	—	10,22	10,9	12,5	16,7	23	∞
$y = \frac{10}{\sqrt{1-\left(\frac{x}{L}\right)^2}} =$ $R = 1290 \cdot \arcsin\left(\frac{x}{L}\right) =$	0	—	—	251,5	531	827	1195	1433	2025

Следует отметить, что, в отличие от принятого, под φ' мы понимаем здесь производную $\frac{d\varphi}{dx}$, а не по аргументу $\frac{x}{L}$.

Вращающийся фигурный реостат. Если каркас реостата повернуть вокруг его оси (рис. 2) на элементарный угол $d\alpha$, то скользящий контакт переместится при этом вдоль оси абсцисс на величину dx , а сопротивление реостата изменится на величину

$$dR = \rho \frac{2\pi y}{s} \frac{dx}{2\pi},$$

где $\frac{2\pi y}{s}$ ρ есть сопротивление витка, соприкасающегося со скользящим контактом, радиус которого y ; $\frac{d\alpha}{2\pi}$ — часть этого витка, по которой переместился скользящий контакт.

Но

$$\frac{d\alpha}{2\pi} = \frac{dx}{d},$$

поэтому

$$dR = \rho \frac{2\pi y}{s} \frac{dx}{d}.$$

Разделив переменные, получим:

$$\frac{dR}{dR} = R_0 \varphi' \left(\frac{x}{L}\right) = \frac{2\pi \rho}{sd} y$$

и

$$y = \frac{sd}{2\pi \rho} R_0 \varphi' \left(\frac{x}{L}\right). \tag{III}$$

Модификации уравнений (II) и (III). Используя соотношение $s = \frac{\pi d^2}{4}$, можно написать:

$$\frac{sd}{2\rho} = \frac{\pi d^3}{8\rho}.$$

Воспользовавшись последним выражением, можно (II) и (III) преобразовать:

$$y_{II} = \frac{\pi d^3}{8\rho} R_0 \varphi' \left(\frac{x}{L} \right) - a, \quad (II)$$

$$y_{III} = \frac{d^3}{8\rho} R_0 \varphi' \left(\frac{x}{L} \right). \quad (III)$$

От производной $\varphi' \left(\frac{x}{L} \right)$ будет появляться множитель $\frac{1}{L}$, поэтому получаемое выражение $\frac{d^3 R_0}{8\rho L}$ может быть преобразовано к виду:

$$\frac{d^3 R_0}{8\rho \frac{L}{d}} = \frac{d^3 R_0}{8\rho N}.$$

Последнее выражение использовано ниже при расчете $y = f \left(\frac{x}{L} \right)$ для заданного $R = R_0 \sin \left(\frac{x}{L} \right)$.

Попутно сделаем одно замечание.

Из сопоставления основных уравнений видно, что для тонкого каркаса ленточного реостата ($a \approx 0$) y_{II} получается больше y_{III} при прочих равных условиях приблизительно в π раз. Если же толщина a ленточного каркаса будет иметь достаточно большое значение, то y_{II} может стать по величине приблизительно равным или даже меньше чем y_{III} . Указанное здесь обстоятельство играет существенную роль при создании конструктивной формы ленточного фигурного реостата.

Теоретическая часть технической задачи может считаться доведенной до конца лишь при выполнении двух условий: 1) если полученные общие формулы доведены до численного решения конкретных задач и 2) если дан способ оценки точности получаемых результатов. Ниже приводится численное решение нескольких конкретных задач с построением кривых $y = f \left(\frac{x}{L} \right)$.

Оценка же точности решения рассматриваемых задач представляет собой самостоятельную тему.

Методология и примеры расчета вращающихся фигурных реостатов. Численное решение задачи при расчете фигурного реостата с вращающимся каркасом согласно (III) производится в следующем порядке:

1. Выбирают величину y_{III0} для такого значения x , при котором

$$y_{III0} = \frac{d^3 R_0}{8\rho} \cdot \frac{1}{L}.$$

2. Задавшись предварительно величинами d , ρ и L из последнего уравнения, определяют значение R_0 .

3. После этого определяют текущие значения y и R для различных значений отношения $\frac{x}{L}$ (0; 0,2; 0,4 ... 1).

4. По полученным в п. 3 координатам $\left(\frac{x}{L}, y \right)$ и

$\left(\frac{x}{L}, R \right)$ строят кривые $y = f \left(\frac{x}{L} \right)$ и $R = R_0 \varphi \left(\frac{x}{L} \right)$.

Аналогичным образом решается задача для фигурного реостата с ленточным (плоским) каркасом.

Результаты расчета вращающихся реостатов по приведенной методологии для пяти различных функциональных сопротивлений сведены в таблицу. Во всех пяти примерах были выбраны следующие одинаковые конструктивные параметры: $L = 300$ мм, $d = 0,2$ мм, $\rho = 0,43 \Omega \text{ мм}^3/\text{м}$

В первом столбце таблицы записаны выбранные пять функций $R = R_0 \varphi \left(\frac{x}{L} \right)$. Во втором столбце приведены полученные согласно уравнению (III) искомые зависимости $y = f \left(\frac{x}{L} \right)$. В третьем столбце выбраны начальные значения $y_{x=0}$ или $y_{x=L}$, или $y_{\frac{x}{L} = \frac{\pi}{4}}$ и т. д. В каждом

частном случае выбор численного начального значения y производится при таком значении x

или $\left(\frac{x}{L} \right)$, при котором в выражение y входит переменная функция, равная единице. Численное же значение для этих ординат следует выбирать, исходя из соображений конструктивности каркасов и технологии изготовления их (это же относится и к выбору величин L и d). Численные значения R_0 , записанные в четвертом столбце, получены из соответствующих уравнений третьего столбца. Наконец, в пятом столбце выписаны выражения текущих значений для y и R , по которым и определяют численные значения их при различных $\frac{x}{L} = 0; 0,2; 0,4 \dots 1$.

По полученным координатам $\left(\frac{x}{L}, y \right)$ построены кривые $y = f \left(\frac{x}{L} \right)$, изображенные на рис. 3; в таблице приведены расчеты лишь для пяти из функций, изображенных в виде кривых на рис. 3; для пяти других функций расчеты опущены.

Для иллюстрации приведем один лишь пример, не внесенный в таблицу.

Определить $y = f \left(\frac{x}{L} \right)$, если R должно изменяться по закону $R = R_0 \left(\frac{x}{L} \right)^m$, где $m = 4$.

Пример аналогичен строке 4 таблицы. Согласно уравнению (III):

$$y = \frac{d^3 R_0}{8\rho} \varphi' \left(\frac{x}{L} \right) = \frac{d^3 R_0}{8\rho} \cdot \frac{m}{L} \left(\frac{x}{L} \right)^{m-1}$$

Выбираем

$$y_{x=L} = \frac{d^3 R_0}{8\rho} \cdot \frac{m}{L} = 0,05 \text{ м} = 50 \text{ мм}.$$

Отсюда

$$R_0 = \frac{0,05 \cdot 8\rho L}{d^3 m} = \frac{0,05 \cdot 8 \cdot 0,43 \cdot 300}{8 \cdot 10^{-8} \cdot 4} = 1\,612,5 \Omega.$$

Текущие значения y и R определяются по формулам:

$$y = 0,05 \left(\frac{x}{L}\right)^3 \text{ м} = 50 \left(\frac{x}{L}\right)^3 [\text{мм}].$$

и

$$R = 1\,612,5 \left(\frac{x}{L}\right)^4 \Omega.$$

Вычисляем координаты нескольких точек для кривых

$$y = f\left(\frac{x}{L}\right) \text{ и } R = R_0 \varphi\left(\frac{x}{L}\right):$$

$\frac{x}{L}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$\left(\frac{x}{L}\right)^m = \left(\frac{x}{L}\right)^4$	0	0,0016	0,0256	0,1296	0,4096	1
$y = 50 \left(\frac{x}{L}\right)^3$	0	0,4	3,2	5,3	25,6	50
$R = 1\,612,5 \left(\frac{x}{L}\right)^4$	0	2,58	41,4	209	660	1\,612,5

Отметим еще раз, что расчет функциональных сопротивлений с ленточными каркасами вполне аналогичен уже рассмотренным расчетам, поэтому приводить примеры для них вряд ли целесообразно.

Заключение. Полученные расчетом и изображенные на рис. 3 кривые $y = f\left(\frac{x}{L}\right)$ для вращающихся реостатов не являются оптимальными, так как для всех десяти примеров здесь были выбраны для простоты расчетов одинаковые параметры L , d и ρ . Однако уже теперь можно прийти к выводу, что изготовление реостатов, сопротивления которых изменяются по законам:

$$R_0 \sin\left(\frac{x}{L}\right), R_0 \operatorname{tg}\left(\frac{x}{L}\right), R_0 e^{\frac{x}{L}}, R_0 \left(\frac{x}{L}\right)^m, \\ R_0 A^{\frac{x}{L}} \text{ и } R_0 \operatorname{arctg}\left(\frac{x}{L}\right),$$

не встретит больших затруднений, в то время как для функции $R_0 \operatorname{arc} \sin\left(\frac{x}{L}\right)$ и в особенно-

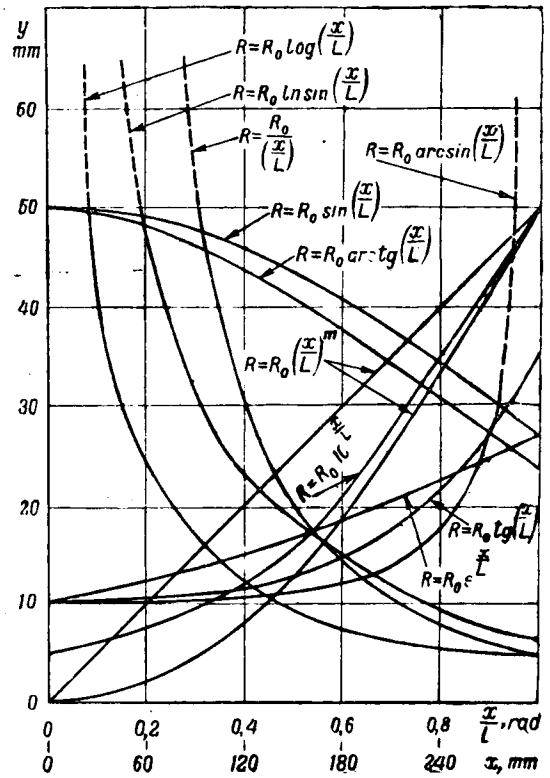


Рис. 3. Конфигурация каркасов $y = f\left(\frac{x}{L}\right)$ вращающихся реостатов для ряда функций $R = R_0 \varphi\left(\frac{x}{L}\right)$.

сти для $R_0 \lg\left(\frac{x}{L}\right)$, $R_0 \ln \sin\left(\frac{x}{L}\right)$ и $R_0 \frac{1}{\frac{x}{L}}$ построить фигурные реостаты указанным способом на полный диапазон изменения $\left(\frac{x}{L}\right)$ от 0 до 1 будет невозможно, и вопрос здесь должен решаться лишь о выборе целесообразных пределов величины $\left(\frac{x}{L}\right)$, в которых конфигурация реостата остается конструктивной.

Следует, наконец, иметь в виду, что по полученным здесь формулам можно рассчитывать сопротивления, изменяющиеся по любой функции $R_0 \varphi\left(\frac{x}{L}\right)$.



Работа электросчетчиков при низкой температуре

Доц. М. А. ЛАВРУХИН

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

Так как основным прибором, служащим для учета электрической энергии, является счетчик, то к его конструкции и тщательности регулировки предъявляются достаточно высокие требования. Допущенные для эксплуатации в наших электросетях счетчики удовлетворяют практически всем основным требованиям, которые к ним предъявляются действующими сейчас нормами. Но в то же время учет электроэнергии в сетях фактически ведется с неточностью, далеко превосходящей эти же нормы.

Обследованиями автора, произведенными в сетях нескольких городов Союза, установлено, что в подавляющем большинстве случаев, и именно в ответственных случаях, счетчики устанавливаются и используются так, что они не могут обеспечить учет энергии с узаконенной точностью. Оказалось, что учет производится с погрешностью, дополнительной сверх норм ОСТ 6 225, доходящей до 7 — 10%.

Это положение объясняется следующими причинами:

1. Как правило, счетчики, учитывающие расход энергии крупных абонентов или расход в районных сетях, устанавливаются в трансформаторных будках или даже на столбах в пунктах ответвлений в легких деревянных шкафах. В этих условиях температура счетчика в зимнее время практически не отличается от температуры наружного воздуха, что проверено непосредственными наблюдениями. *Понижение температуры оказывает очень сильное влияние на смазку в подпятнике и подшипниках счетчика.* Обычно применяемое для этой цели костяное масло с понижением температуры быстро повышает свою вязкость и полностью затвердевает уже при -15°C . Это вызывает значительное увеличение трения и появление дополнительной погрешности показаний. В некоторых случаях при сильном понижении температуры наблюдается полная остановка счетчика именно из-за замерзания смазки.

2. При подготовке счетчиков в лабораториях электрических станций подпятники часто *смазываются неправильно*, пользование маслом и его хранение производится без соблюдения предосторожностей, обеспечивающих его чистоту и

Отсутствие смазки в электросчетчиках, выбор смазочного масла без учета температурных условий и другие нарушения влекут за собой большие погрешности в показаниях счетчиков, что значительно ухудшает учет электроэнергии. На основе экспериментальных данных сформулированы основные требования к смазке электросчетчиков.

неизменность основных свойств. И, что особенно важно для смазки подпятников, часто применяются сорта масел, вообще не пригодные для этой цели.

Если первая из указанных причин относится к счетчикам крупных потребителей, включаемых с измерительными трансформаторами, которые работают при низкой температуре, то вторая причина — плохая смазка подпятников — относится вообще ко всем счетчикам, включая и квартирные, число которых очень велико.

Таким образом вопрос о смазке счетчика и трении в нем, вернее о постоянстве этого трения, имеет очень важное значение для организации правильного учета энергии в сетях. Это далее будет иллюстрировано примерами.

При рассмотрении работы счетчика необходимо учесть специфические особенности условий трения в его подпятнике. Во-первых, удельное давление под шариком подпятника достигает отнесительно больших значений. Например, в однофазном счетчике типа Б2 (завод «Электроприбор») при весе подвижной части около 21 г удельное давление составляет $12\,000\text{ kg/cm}^2$. Во-вторых, скорости вращения пяты по камню малы — они достигают $80 \div 100$ об/мин, поэтому при больших удельных давлениях процесс смазывания пяты чрезвычайно затруднен.

Для обеспечения смазывания в гнезде трения подпятника счетчика нужно применять такие вещества, которые обладают особыми свойствами образовывать в этих условиях хотя бы тончайшие пленки, обеспечивающие необходимое смазывание трущихся поверхностей и снижение трения между ними.

Важность правильной работы подпятника легко показать на следующем примере. По данным одной из наших крупнейших энергосистем в общем числе снимаемых с линии счетчиков после их работы в течение 4—5 лет обнаруживаемые неисправности распределяются следующим образом: порча осей и камней—81%, сгущение масла в подпятнике—8%, прочие неисправности—11%.

Вполне уместно задать вопрос, что же показывали эти счетчики перед их снятием с линии и когда указанные дефекты могли в них возникнуть.

К сожалению, среди работников электросетей и энергосбытовых организаций далеко не редко можно услышать сомнение в необходимости вообще смазки в счетчиках и еще чаще обнаруживается полная неосведомленность в необходимых свойствах масла и ряде элементарных деталей технологии процесса обслуживания подпятника. Поэтому будет не лишним хотя бы вкратце разобрать эти вопросы.

Значение и необходимость смазки подпятника иллюстрирует работа Грюнберга¹, исследовавшего изнашиваемость шариков (цапф) и камней подпятников счетчиков. Им установлено, что износ пары трения при отсутствии специально введенной смазки начинается чрезвычайно скоро. Средние значения для испытанной партии камней и шариков приведены в таблице. Из данных таблицы видно, что уже после одного миллиона оборотов без смазки 83% цапф и 57% камней имеют явные следы износа.

Таблица 1

Число оборотов (млн.), сделанное цапфой	Средний диаметр площадки износа цапфы, мм	Средний диаметр площадки износа камня, мм	Число оставшихся неповрежденными, %	
			цапф	камней
1·10	0,121	0,101	17	43
2·10	0,159	0,156	6	28
3·10	0,183	0,184	2	27
5·10	0,212	0,204	0	26
10·10	0,256	0,259	0	12

Для определения влияния на работу счетчика степени износа пары трения подпятника Грюнберг испытывал счетчики, устанавливая в них камни и цапфы с одинаковыми площадками износа и постепенно увеличивая износ. На рис. 1 приведены полученные им значения дополнительной погрешности однофазного счетчика с конструктивными данными, близкими к нашему счетчику типа Б2, для трех разных скоростей вращения якоря. Кривые показывают, что при диаметре площадки износа 0,2 мм дополнительная погрешность показаний счетчика при нагрузке в 10% составляет 2,5%, 5%—4,5%, при нагрузке в 2%—13,0%.

Интересно применить результаты Грюнберга к нашему однофазному счетчику Б2. Например, счетчик на 5 А и 120 В имеет емкость счетного механизма 1 000 кВт·ч и фабричную постоянную 1 кВт·ч—5 000 оборотов якоря. Таким образом 1 000 кВт·ч соответствует $5 \cdot 10^6$ оборотам якоря, что по приведенным данным соответствует износу пары подпятника в 0,212 мм и при нагрузке в 10% от номинальной дополнительной погрешности счетчика около 3%. При ограниченном потреблении расход энергии в бытовых условиях составляет 1,5 кВт·ч в сутки, при нормальном—около 5 кВт·ч. Таким образом емкость счетного механизма счетчика будет использована за $1\,000 : 1,5 = 670$, или $1\,000 : 5 = 200$ суток. Следовательно, в первом случае через 2 года и

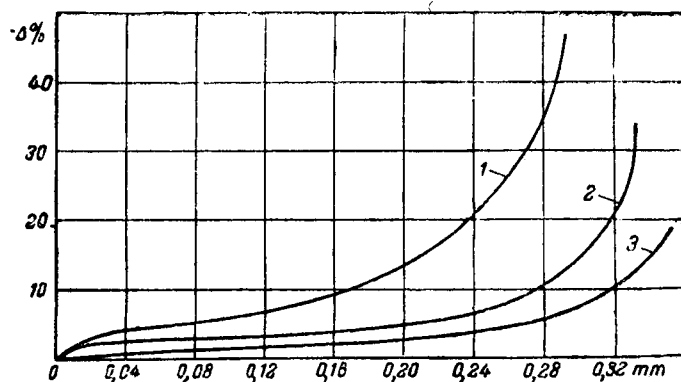


Рис. 1. Погрешность счетчика в зависимости от диаметра поверхностей износа пары трения подпятника. 1— нагрузка составляет 2% номинальной; 2— 5%; 3— 10%.

во втором уже через 7 мес. счетчик, не бывший ранее в эксплуатации, имел бы при малой нагрузке только дополнительную погрешность показаний, превышающую допустимую по ОСТ 6225.

Эти данные убедительно говорят о полной невозможности эксплуатировать счетчики без смазки их подпятников. Но в такое же состояние, очевидно, придут счетчики с плохой смазкой или если их смазка не способна выполнять свою роль в тех или иных условиях эксплуатации и благодаря упомянутой выше специфической особенности работы подпятника.

К таким особым условиям необходимо отнести понижение температуры счетчика. Как уже упоминалось, применяемое сейчас, как правило, костяное масло затвердевает уже при -15°C . Естественно, что зимой при описанных условиях эксплуатации счетчики охлаждаются и до более низкой температуры, и смазывание в их подпятниках прекращается, так как затвердевшее масло полностью выдавливается из гнезда трения.

Автор провел исследования работы счетчиков при пониженной температуре и при нескольких сортах смазывающего вещества в подпятниках: с костяным маслом, с морозоустойчивыми маслами МВП, МЗС и велосит, с морозоустойчивыми консистентными смазками аэрофлот 60 и АТЭ-1 и без введения специальной смазки². На диаграмме рис. 2 приведены кривые изменения основной погрешности (дополнительная погрешность) счетчика в функции изменения окружающей температуры при этих смазках. Кривые построены по данным испытания при нагрузках 100%, 50 и 10% номинальной. На рис. 3 и 4 приведены кривые ускорений якоря, пропорциональные моменту трения в счетчике, при тех же смазках и различных температурах в функции скорости якоря. Кривые погрешности и кривые трения показывают сильное ухудшение работы счетчика с понижением температуры. Характер кривых погрешности определяется, конечно, не только изме-

² Понятие несмазанной поверхности практически не имеет смысла, так как любая тщательно очищенная поверхность в данных условиях абсорбирует из воздуха пары влаги, пылинки и т. д. и оказывается смазанной ими.

¹ G. Grunberg. Rev. Géa. de l'élec., стр. 273, т. 28, № 8, 1930.

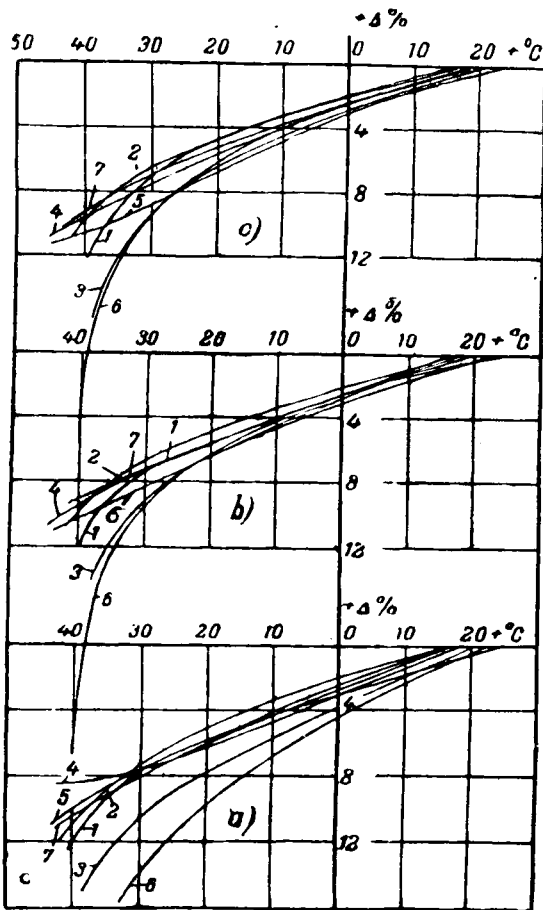


Рис. 2. Среднее изменение погрешности в зависимости от температуры при различной смазке подпятников.

1 — масло костяное К-18; 2 — марки МКП; 3 — МЭС; 4 — велосит; 5 — Аэрофлот 60; 6 — АТЭ-1; 7 — подпятники без смазки (а — 10%; б — 50%; в — 100% нагрузки).

нением свойств смазки, но и изменением электрических и магнитных параметров механизма счетчика, что говорит о недостаточной температурной компенсации исследованного счетчика Б2.

Кривые изменения момента трения, полученные методом свободного выбега якоря одновременно и в тех же условиях, что и при определении кривых погрешности, непосредственно определяются свойствами примененной смазки. Как показывают эти кривые, при нормальной температуре все испытанные масла и смазки дают практически одинаковые результаты, за исключением консистентной смазки АТЭ-1, при которой трение вообще очень велико и которая явно непригодна для счетчиков. Интересно, что ее кривая при -40°C оказалась ниже других. Это следует объяснить тем, что смазка загустела настолько, что выдавилась из-под шарика и прекратила участие в работе пары.

Как показывают приведенные кривые, наиболее устойчивое трение при понижении температуры оказалось при морозостойких маслах МВП и велосит. Это и понятно, так как именно они обладают наиболее подходящими и специфическими свойствами из всех испытанных смазок.

При продолжении изучения и выбора наиболее целесообразных сортов смазки для подпятников счетчиков предстоит исследовать ряд морозостойчивых масел с особыми присадками, как, например, МВП с присадкой 1% трикреазилфосфата и велосит + 1% парафлору. Как известно, с помощью присадок можно значительно снизить температуру застывания морозостойчивых масел и, что особенно важно, улучшить в них процессы структурообразования и стабилизации. Но уже проведенные исследования доказывают полную непригодность для смазки подпятников костяного масла и значительное улучшение работы счетчика при смазке специальными морозостойчивыми маслами.

Сейчас уже можно сформулировать ряд основных требований к смазывающему веществу для подпятника:

1. Масло должно обладать достаточной маслянистостью, обеспечивающей наименьшее трение в подпятнике счетчика во всем диапазоне изменения его рабочей температуры (см. п. 5).

2. Способность растекаться (ползучесть) на поверхности камня (корунд) и шарика (сталь) должна практически отсутствовать.

3. Вязкость вообще должна быть возможно меньшей.

4. Изменение вязкости во всем диапазоне рабочей температуры счетчика должно быть возможно меньшим, т. е. кривая изменения вязкости в функции температуры должна быть возможно более полой, особенно при низких температурах.

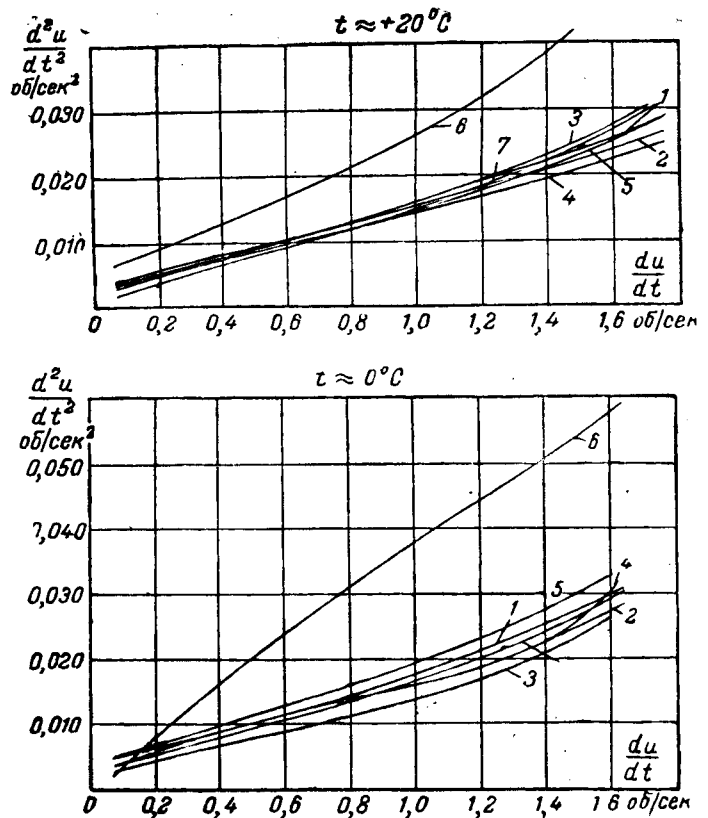


Рис. 3. Ускорение якоря в зависимости от скорости.
1 — смазка подпятников, масло костяное К-18; 2 — марки МВП; 3 — МВС; 4 — велосит; 5 — Аэрофлот 60; 6 — АТЭ-1; 7 — подпятники без смазки.

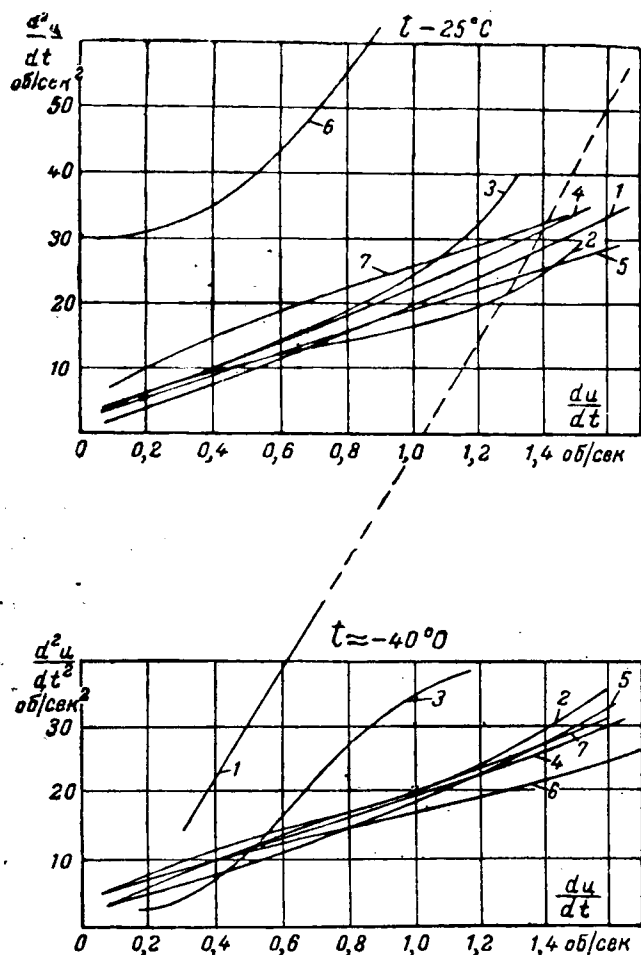


Рис. 4. Ускорение якоря в зависимости от скорости.

1—смазка подпятников, масло костяное К-18; 2—марки МПВ; 3—МЭС; 4—велосит; 5—Аэрофлот 60; 6—АТЭ-1; 7—подпятники без смазки.

5. Рабочая температура масла должна определяться границами от $+50^{\circ}\text{C}$ до -35°C .

6. Температура застывания не должна быть выше -60°C .

7. Процесс структурообразований в масле при охлаждении до температуры застывания должен быть наиболее благоприятным в механическом отношении.

8. Химическая стабильность должна быть наибольшей (во всяком случае не менее трех лет).

9. Испаряемость и улетучиваемость при температуре до $+40^{\circ}\text{C}$ должны быть практически ничтожными.

10. Масло не должно вызывать коррозии на поверхности шарика (сталь) и предохранять ее от коррозии во всем диапазоне рабочей температуры.

11. Масло должно соответствовать материалам пяты подпятника, в смысле влияния этих материалов на устойчивость самого масла, и не подвергаться влиянию на него других элементов конструкции счетчика.

Очевидно, в технических условиях должна быть указана соответствующая методика испытаний масла по всем пунктам. Не менее важным, чем разработка технических условий на масло, является составление четких производственных инструкций для лабораторий счетчиков на электрических станциях, так как далеко не секрет, что их или нет совсем или они неудовлетворительны. В них должны быть указаны способы подготовки поверхностей трения, способы введения смазки в гнездо трения, предохранения подготовленных подпятников от засорения и способы хранения самого масла.

Наконец, ГОСТ на электрические счетчики энергии и правила их проверки должны быть дополнены прямыми указаниями на безусловную необходимость смазки подпятников счетчиков маслами, соответствующими условиям эксплуатации, и содержать пункты, устанавливающие контроль за этим.

Перечисленные мероприятия, несомненно, должны улучшить качество работы счетчиков и довести фактическую точность учета энергии в электрических сетях до существующих сейчас требований норм, что вполне равноценно соответствующей экономии энергии.

Одновременно эти же мероприятия снизят износ в подпятниках счетчиков, т. е. сократят расходы по их ремонту и значительно удлинит сроки их службы.



Оптимальное местоположение узловой точки в трехлучевых схемах электросетей

Инж. Н. Г. ГЕЙНИН

Ленинградское отделение треста «Теплоэлектропроект»

В практике выполнения высоковольтных сетей, наряду с радиальными, кольцевыми и тому подобными схемами, нашли применение схемы с от-

ветвлениями, в которых идущий с электрической станции или подстанции радиальный фидер (линия) разветвляется на два луча — к двум различным потребителям. Для таких схем представляется необходимым правильно выбрать направление питающего луча, местоположение точки отщвления и направления лучей к потребителям. Эта задача сводится к нахождению оптимального местоположения узловой точки трехлучевой звезды независимо от направления энергии в том или другом луче (к узловой точке или от нее). Если топографически известны точки расположения источника питания и потребителей (вершины A, B, C — рис. 1), то местоположение узловой точки O вполне определяет длины и направления лучей трехлучевой схемы.

При рассмотрении этой задачи исключены особые условия, влияющие на выбор местоположения узловой точки, например, особенности топографии трасс, условия падения напряжения и т. п.

Условия оптимального решения. Условия оптимального решения для различных частных случаев поставленной задачи могут формулироваться в виде требований: минимума суммарной длины лучей; расхода цветного металла; потерь электроэнергии; капитальных затрат и годовых отчислений; или, наконец, минимума нескольких перечисленных величин. Указанные условия оптимального решения для трехлучевой схемы могут быть выражены общим аналитическим условием:

$$P = k_A L_{0A} + k_B L_{0B} + k_C L_{0C} = \text{minimum}, \quad (1)$$

где:

L_{0A}, L_{0B}, L_{0C} — длины лучей;

k_A, k_B, k_C — постоянные множители, характеризующие расходы, потери и т. д. на единицу длины для соответствующего луча.

Дается аналитическое обоснование и графический метод нахождения оптимальной узловой точки электрической сети (например, ответвления от линии электропередачи). В приложении даны выведенные автором «теоремы трисекционирования», послужившие основанием графического решения.

Перемещением узловой точки O могут быть изменены длины L_{0A}, L_{0B} и L_{0C} и соответственно может быть изменена сумма в уравнении (1). Для

нахождения оптимального расположения узловой точки надлежит, следовательно, найти минимум величины P , пользуясь обычными математическими приемами.

Аналитическое решение. При изображенных на рис. 2 направлениях координатных осей и величинах координат точек A, B, C и O — длины лучей могут быть выражены:

Рис. 1. Узловая точка трехлучевой звезды (трисекционный треугольник).

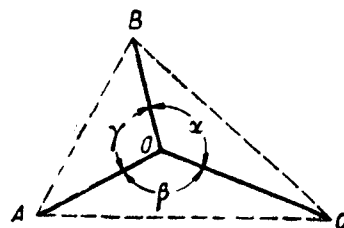
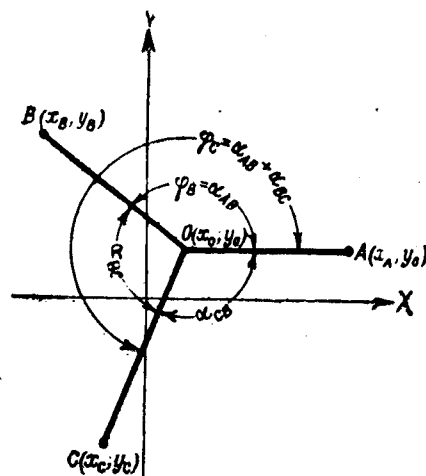


Рис. 2. Аналитическое нахождение оптимальной узловой точки.



$$L_{0A} = (x_A - x_0);$$

$$L_{0B} = \sqrt{(x_B - x_0)^2 + (y_B - y_0)^2},$$

$$L_{0C} = \sqrt{(x_C - x_0)^2 + (y_C - y_0)^2},$$

и выражение для P может быть представлено:

$$P = k_A(x_A - x_0) + k_B \sqrt{(x_B - x_0)^2 + (y_B - y_0)^2} + k_C \sqrt{(x_C - x_0)^2 + (y_C - y_0)^2}. \quad (2)$$

Условием минимума P является равенство нулю частных производных:

$$\frac{\partial P}{\partial x_0} = 0 \text{ и } \frac{\partial P}{\partial y_0} = 0,$$

или, беря производные для правой части выражения (2):

$$\left. \begin{aligned} k_A + k_B \frac{x_B - x_0}{\sqrt{(x_B - x_0)^2 + (y_B - y_0)^2}} + k_C \frac{x_C - x_0}{\sqrt{(x_C - x_0)^2 + (y_C - y_0)^2}} &= 0, \\ k_B \frac{y_B - y_0}{\sqrt{(x_B - x_0)^2 + (y_B - y_0)^2}} + k_C \frac{y_C - y_0}{\sqrt{(x_C - x_0)^2 + (y_C - y_0)^2}} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Равенства (3), как явствует из рис. 2, могут быть выражены через углы между лучами, а именно:

$$\left. \begin{aligned} k_A + k_B \cos \varphi_B + k_C \cos \varphi_C &= 0, \\ k_B \sin \varphi_B + k_C \sin \varphi_C &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где φ_B — угол между лучами OA и OB ,
 φ_C — угол между лучами OA и OC .

Решение уравнений (4) определяет значения углов:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_B &= \arccos \frac{k_C^2 - k_A^2 - k_B^2}{2 k_A k_B}, \\ \varphi_C &= \arccos \frac{k_B^2 - k_A^2 - k_C^2}{2 k_A k_C}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Оптимальные углы между лучами составят:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{AB} = \varphi_B &= \arccos \frac{k_C^2 - k_A^2 - k_B^2}{2 k_A k_B}, \\ \alpha_{BC} = \varphi_C - \varphi_B &= \arccos \frac{k_B^2 - k_A^2 - k_C^2}{2 k_A k_C} - \arccos \frac{k_C^2 - k_A^2 - k_B^2}{2 k_A k_B}, \\ \alpha_{CB} &= 2\pi - (\alpha_{AB} + \alpha_{BC}), \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

и искомая оптимальная узловая точка располагается внутри треугольника так, что углы между лучами приобретают оптимальные значения по формулам (6).

Следует отметить, что не всегда формулы (6) совместимы с условием размещения оптимальной узловой точки внутри треугольника, в таких случаях она фактически располагается в одной из вершин или на периметре треугольника и легко находится дополнительными рассуждениями для каждого конкретного случая.

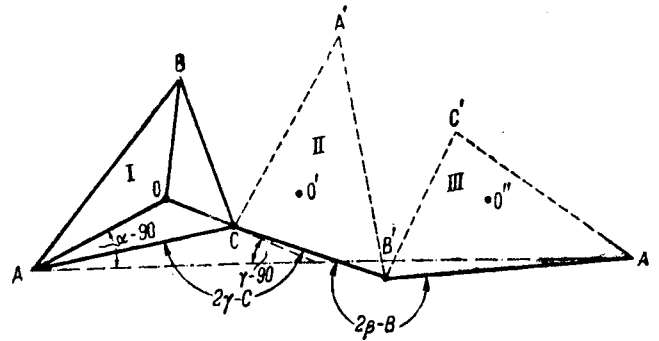


Рис. 3. Графическое нахождение оптимальной узловой точки. Пунктирные положения треугольников (II и III) показаны иллюстративно.

Графическое нахождение оптимальной узловой точки. При фиксированном положении вершин звезды (A, B, C — рис. 3) и известных углах между лучами ее графическое нахождение узловой точки производится графическим методом, основанным на теореме трисекционирования треугольника, доказательство которой дано автором в приложении.

Точки A, B и C соединяются в $\triangle ABC$ (рис. 3); от точки C под углом $(2\gamma - \angle C)$ проводится линия $CB' = CB$ и затем от точки B' под углом $(2\beta - \angle B)$ линия $B'A' = BA$. Затем полученная точка A' соединяется прямой с точкой A и из точки A проводится луч AO под углом $(\alpha - 90^\circ)$ к направлению AA' и из точки C луч CO под углом $(\gamma - 90^\circ)$ к направлению $A'A$. Пересечение лучей AO и CO дает искомую узловую точку O .

Для частного случая, когда требуется найти минимум суммарной длины лучей:

$$k_A = k_B = k_C = 1$$

и углы по формулам (6):

$$\alpha_{AB} = \alpha_{BC} = \alpha_{CA} = 120^\circ,$$

т. е. оптимальная узловая точка должна быть расположена таким образом, чтобы направление всех трех лучей было симметрично. В этом случае графическое нахождение узловой точки удобнее произвести так¹ (рис. 4). Из вершин

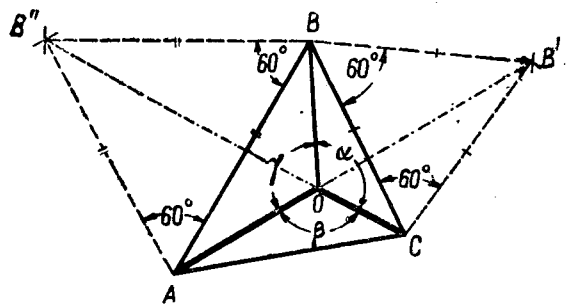


Рис. 4. Графическое нахождение узловой точки при заданных точках концов лучей (A, B, C) и симметричном направлении лучей ($\alpha = \beta = \gamma = 120^\circ$).

Построение $CB'' = BB' = CB$; $AB'' = BB'' = AB$. Пересечение прямых AB'' и CB' дает искомую узловую точку O .

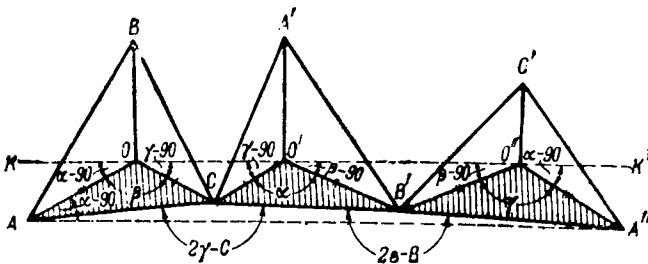


Рис. 5. Соотношения углов при трисекционировании треугольника.

C и B как из центров проводятся дуги радиусом $r_1 = BC$ и точка взаимного пересечения дуг B' соединяется с точкой A . Аналогично из точек A и B проводятся дуги радиусом $r_2 = AB$ и точку их взаимного пересечения B'' соединяют с вершиной C . Точка пересечения прямых AB' и CB'' дает искомую узловую точку O .

ПРИЛОЖЕНИЕ

Трисекция треугольника. Трисекционным треугольником (рис. 1) в дальнейшем названа фигура, представляющая собой треугольник с вписанной в него трехлучевой звездой, делящей основной треугольник ABC на три составляющих треугольника AOB , BOC и AOC . Центр вписанной звезды O именуется трисекционным центром, лучи звезды — OA , OB , OC — трисекционными лучами, углы между лучами — α , β , γ — трисекционными углами.

Каждой стороне основного треугольника противолежат два угла: угол своей противоположной вершины и противолежащий трисекционный угол у центра.

Так, стороне AB противолежат $\angle C$ и γ ,
 BC " $\angle A$ и α ,
 AC " $\angle B$ и β .

Условия трисекционирования треугольника могут быть весьма разнообразными, но практически они могут быть приведены к условию задания величин трисекционных углов. Задача трисекционирования сводится поэтому к задаче нахождения трисекционного центра заданного основного треугольника при известных трисекционных углах. Графическое решение этой задачи вытекает как следствие из следующих теорем трисекционирования.

Если трисекционный треугольник ABC (рис. 5), имеющий трисекционные углы α , β и γ , повернуть вокруг вершины C на угол 2γ и из повернутого положения $CA'B'$ снова повернуть вокруг вершины B' на угол 2β в третье положение $B''A''C''$, то:

1) трисекционные центры O, O', O'' во всех трех положениях располагаются на одной прямой;

2) Прямая OO'' , соединяющая все три трисекционных центра, параллельна прямой AA'' , соединяющей начальное и конечное положения вершины A .

¹ Это построение известно в геометрии как построение Висперга; оно может быть также получено, как частный случай, из общей теоремы трисекционирования, приведенной в приложении.

Доказательства. 1. Соединим прямыми точку O с O' и точку O' с O'' и рассмотрим $\triangle OCO'$ и $\triangle O'B'O$. Эти треугольники по построению являются равнобедренными: $OC = O'C$ и $O'B' = O''B'$. Также по условиям построения углы при вершинах этих треугольников составляют:

$$\begin{aligned}\angle OCO' &= 4d - 2\gamma, \\ \angle O'B'O &= 4d - 2\beta.\end{aligned}$$

Отсюда для углов при основаниях равнобедренных треугольников

$$\angle CO'O' = \frac{2d - \angle OCO'}{2} = \frac{2d - 4d + 2\gamma}{2} = \gamma - 90^\circ,$$

$$\angle B'O'O' = \frac{2d - \angle O'B'O'}{2} = \frac{2d - 4d + 2\beta}{2} = \beta - 90^\circ.$$

Далее, определяем угол, образуемый прямыми OO' и $O'O''$ у точки O' :

$$\begin{aligned}\angle OO'O'' &= \angle OO'C + \angle C'O'B' + \angle B'O'O'' = (\gamma - 90^\circ) + \\ &+ \alpha + (\beta - 90^\circ) = \alpha + \beta + \gamma - 180^\circ.\end{aligned}$$

Но $\alpha + \beta + \gamma = 360^\circ$ отсюда $\angle OO'O'' = 180^\circ$, т. е. прямые OO' и $O'O''$ являются продолжением одна другой, что и требовалось доказать.

2. Продолжим прямую OO'' вправо от точки O'' и влево от точки O . Рассматривая углы при вершинах O и O'' имеем

$$\begin{aligned}\angle AOK + \beta + \gamma - 90^\circ &= 180^\circ, \\ \angle A''O''K' + \beta + \gamma - 90^\circ &= 180^\circ;\end{aligned}$$

отсюда

$$\angle AOK = \angle A''O''K' = \alpha - 90^\circ,$$

т. е. равные по построению отрезки $O''A''$ и OA , заключенные между прямыми AA'' и KK' , имеют равные углы наклона к последней. Следовательно, прямые AA'' и KK' взаимно параллельны, что и доказывает вторую теорему.

Следствие. Трисекционные лучи OA и OC в первоначальном положении трисекционного треугольника образуют с направлениями OO'' или, что то же с AA'' , углы:

$$\begin{aligned}\angle OAC &= \angle AOK = \alpha - 90^\circ, \\ \angle O'OC &= \angle OCA = \gamma - 90^\circ,\end{aligned}$$

зависящие только от величин трисекционных углов. Это следует непосредственно из рис. 3.

Так как нахождение направления AA'' при топографически заданном треугольнике и известных величинах трисекционных углов не вызывает затруднений, то вышеуказанное определение направления трисекционных лучей к прямой AA'' позволяет легко найти трисекционный центр. Для этого (рис. 3) путем двукратного поворота сначала $\triangle ABC$ вокруг вершины C на угол 2γ и затем $\triangle CB'A'$ вокруг вершины B' на угол 2β находим точку A'' и направление AA'' . Затем в первоначальном $\triangle ABC$ проводим через вершину A луч AO под $\angle(\alpha - 90^\circ)$ к AA'' , через вершину C луч CO под $\angle(\gamma - 90^\circ)$ к AA'' .

Точка O пересечения этих лучей и является искомым центром трисекции для заданных трисекционных углов.



Игнитроны на электрифицированном транспорте

Инж. М. Д. ТРЕЙВАС

Всесоюзный научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта

Исследование работы низковольтных стеклянных выпрямителей позволило прийти к выводу о целесообразности замены их анодными вентилями, допускающими включение по двухтактной схеме (Греца). Поскольку электропромышленность выпускала подобные вентили, было предложено (в связи с рядом преимуществ этой схемы) использовать анодные, стеклянно-металлические игнитроны повышенной вентильной прочности на тяговых подстанциях электрифицированных железных дорог.

Первая подобная установка, состоявшая из двух секций (по 6 вентилей в секции), со схемами зависимого и независимого поджигания, была собрана в 1942 г. на одной из тяговых подстанций Пермской железной дороги.

Испытания установки показали полную пригодность игнитронов для работы при высоком напряжении на контактную сеть и одновременно выявили ряд конструктивных недостатков вентилей.

На заводе «Светлана» была изготовлена новая опытная партия стеклянно-металлических игнитронов типа И-100/9000, с наибольшим значением выпрямленного тока 100 А, наибольшей амплитудой обратного напряжения 9000 В, мгновенным значением тока поджигателя 20 А и напряжением поджигателя 150 В.

Общий вид подобного игнитрона изображен на рис. 1. Анодная стеклянная камера его 1, сваренная с медным катодным стаканом 3, вмещает в себе графитовый, куполообразный анод 6, внутри которого находится изолированный от других токоведущих частей диффузор 11, который имеет свой вывод через один из рогов 8 камеры. Другой рог 9 использован для ввода поджигателей 2 конической формы, опущенных в ртуть на дне катодного стакана 10. На верхней части последнего посредством квар-

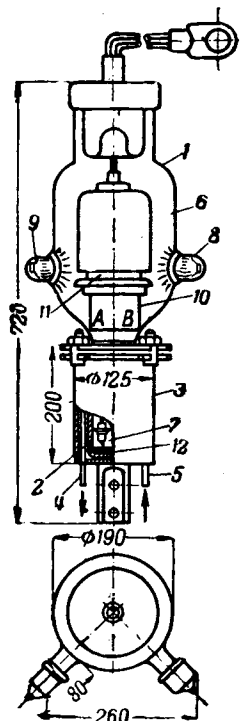


Рис. 1. Игнитрон завода «Светлана».

В статье приводится описание стеклянно-металлических игнитронов и результаты испытаний этих игнитронов, собранных по двухтактной схеме на одной из тяговых подстанций электрифицированного участка Пермской железной дороги.

цевых изоляторов укреплен диффузор.

Удлиненный катодный стакан и диффузор предотвращают разбрызгивание

ртути из катода на стенки баллона, а диффузор кроме того препятствует прямым ударам электронов в анодную головку благодаря отверстиям, расположенным по его цилиндрической, а не горизонтальной поверхности. Воздушное охлаждение анода и водяное катода создают то различие температур, которое заставляет ртутные пары конденсироваться, в основном, у катода, уменьшает плотность паров у анода и в итоге повышает вентильную прочность игнитрона.

Новая группа вентилей, собранная в одну секцию по той же схеме Греца с зависимым поджиганием, осуществленным через тиратроны ТГ-15/3000, подключена к одной из звезд вторичной обмотки трансформатора ТМР 1800/35, номинальной мощностью 1515 кВА и с вторичным фазовым напряжением 1500 В.

Как видно из элемента схемы электрических соединений (рис. 2), смонтированная установка помимо обычной максимальной защиты на стороне 35 кВ имеет быстродействующую защиту на вторичной стороне силового трансформатора. При срабатывании реле РБУ-3 закорачивает (с последующим разрывом цепи) вторичную обмотку фазо-

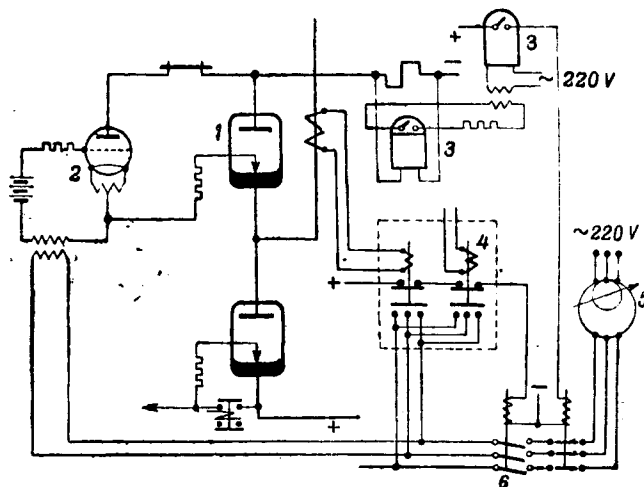


Рис. 2. Элемент схемы электрических соединений ИВ.
1—игнитрон; И-100/9000; 2—тиратрон ТГ-15/3000; 3—токовое реле ЭТ-71
4—быстродействующее реле РБУ-3; 5—фазорегулятор; 6—реле ЭП-231.

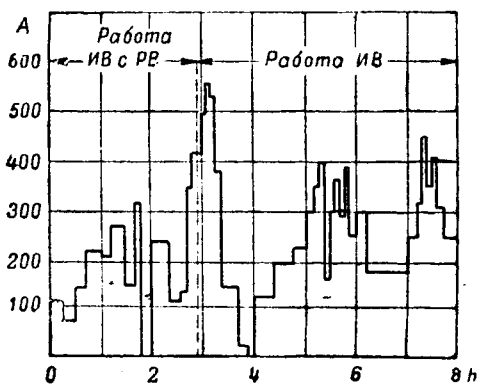


Рис. 3. График нагрузки ИВ при работе его на контактную сеть.

регулятора, в результате чего с сеток тиратронов снимается отпирающее напряжение и подача импульсов тока к поджигателю игнитрона прекращается. На стороне выпрямленного тока помимо БАОД имеется максимальная токовая защита мгновенного действия, выполненная с помощью реле ЭТ-71 с шунтом (в анодной цепи ИВ). Эта защита через второе такое же реле воздействует в свою очередь на цепи питания сеточных трансформаторов. Из дополнительных видов защиты (не указанных на рисунке) следует отметить защиту минимального напряжения цепей накала поджигающих вентилях, которая отключает ВМ при снижении накала ниже допустимого.

Проведенные испытания в основном сводились к определению возможности как самостоятельной работы игнитронного выпрямителя на контактную сеть, так и параллельной с ртутным выпрямителем и с мотор-генератором.

Поэтому после работы на реостат ИВ был включен на контактную сеть. 18-часовая самостоятельная работа его и 38-часовая работа параллельно с РВ, а затем с мотор-генератором при нагрузках, доходивших до 550 А (рис. 3), показала полную возможность использования новых вентилях на тяговых подстанциях электрифицированных дорог. Как видно из рис. 4, ИВ при параллельной работе с РВ всю нагрузку до 200 А брал на себя, деля ее поровну с РВ лишь при 900 А. Хотя специальные перегрузочные режимы при испытаниях и не производились, однако графики нагрузки показывают, что игнитронный выпрямитель выдерживает перегрузки по классу А МЭК.

При значительных перегрузках, а также имевших место коротких замыканиях и обратных зажиганиях, сеточная защита ИВ срабатывала безотказно, причем ВМ успевал отключаться только в редких случаях, без разрыва им мощности. Плавная и достаточно глубокая регулировка выпрямленного напряжения позволяла легко снижать значительные нагрузки ИВ. Ввиду сильного искажения при регулировании, формы кривой выпрямленного напряжения, оказывающего влияние на линии связи, применение подобного способа устранения перегрузок нежелательно.

К недостаткам самих вентилях следует отне-

сти: ограниченный срок службы; постоянный расход мощности на накал и необходимость выбора вентилях на высокое обратное напряжение. Одновременно следует отметить и конструктивные недостатки самих вентилях: крепление

диффузора, которое должно быть выполнено более тщательно и с повышенной изоляцией; крепление выводов обоих поджигателей в одном роге, в то время как следовало бы вывести их изолированно друг от друга, чтобы иметь возможность пользоваться ими поочередно; малая вентиляная (статическая) прочность, которая должна быть не менее 25 кВ; не коаксиальность диффузоров по отношению к анодным головкам; различные сопротивления наконечников поджигателей.

Несмотря на указанные недостатки, положительные результаты испытаний позволили включить установку в опытную эксплуатацию, которая уже в течение более 1 000 h работы протекает вполне нормально. Несмотря на сравнительно небольшую мощность нового выпрямителя (300 А, 3 300 В), она все же является достаточной для питания электровоза, ведущего 800—900 t состав на трассе с значительными уклонами. Следует констатировать, что электрифицированный транспорт получил новый экономичный и более технически совершенный выпрямитель.

Несложная технология изготовления анодных металлических вентилях, при стеклянных игнитронах еще более упрощена и требует самого простого станочного оборудования. Необходимость в изготовлении анодной и катодной фарфоровой и кварцевой изоляции отпадает вообще. Сокращаются строительные работы по зданию подстанции как из-за уменьшения размеров и весов выпрямителей (стеклянно-металлический игнитрон по объему в 5—6 раз менее анодного цилиндра и в 15—20 раз легче его), так и отсутствия необходимости иметь какие-либо кран-балки или другие средства для подъема сосудов. К преимуществам новых игнитронов следует отнести также: отсутствие у них вакуумной установки; возможность быстрой смены выбывающего из строя вентиля (10—15 min); отсутствие необходимости в формовке и переборке отдельных сосудов; сравнительно малая стоимость при массовом изготовлении.

Только быстрое разрешение вопроса о выпуске этих игнитронов со всей вспомогательной к ним аппаратурой устранил те трудности, которые испытывает электрифицированный транспорт в области преобразователей для тяговых подстанций.

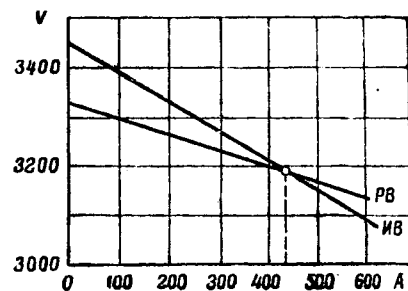


Рис. 4. Внешние характеристики ИВ и РВ.



Сверхмощный генератор импульсных токов

Доктор техн. наук И. С. СТЕКОЛЬНИКОВ

Энергетический институт Академии наук СССР

В лаборатории высоковольтного разряда ЭНИН Академии наук СССР построен и испытан генератор, который обладает способностью производить весьма значительные импульсные токи. Параметры контура генератора следующие: общая емкость — 34,3 Ф; рабочее напряжение конденсаторов — 70 кВ, а испытательное (при двух типах конденсаторов — 1 000 и 200 кВ; ¹ самоиндукция контура с шунтом ($R_{ш} = 2 \cdot 10^{-3} \Omega$) для осциллографирования токов равна 0,67 мкН; полное сопротивление генератора $= 0,140 \Omega$; энергия, запасаемая в конденсаторах, при 75 кВ достигает 93 000, а при 100 кВ — 166 500 Дж. Заряд контура происходит от трансформатора рентгеновского типа напряжением 100 кВ, мощностью 5 кВА, лишь через один кенотрон (оригинальный метод, позволяющий вести заряд при небольшой мощности).

Генератор является самым мощным из построенных импульсных контуров как по расходуемой в разряде энергии, так и по максимально достигаемому току, что иллюстрируется данными, приведенными в таблице. Замечательным качеством его является низкое полное сопротивление — Z, впервые достигнутое при столь больших напряжениях конденсаторов. Генератор установлен в отдельном, полностью экранированном помещении.

Осциллографирование тока производится с помощью запаянного осциллографа, работающего в импульсном, форсированном режиме; осциллограммы фотографируются с экрана с помощью объектива светосилой 1,4 (скорость регистрации достаточна для получения четких записей).

¹ Конденсаторы изготовлены в Ленинградском политехническом институте.

Градуировка времени при осциллографировании осуществляется генератором незатухающих колебаний с частотой 330 кГц. На рисунке приведена одна из осциллограмм тока I_m с амплитудой, равной 440 кА.

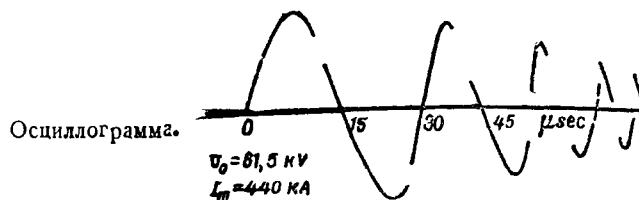
Этот ток получен при напряжении на конденсаторах $= 1,5$ кВ. Токи такой величины еще никогда не генерировались каким-либо из известных источников. Максимальный зарегистрированный, среди тысяч разрядов молний, ток достигал лишь 230 кА.

Измерение напряжения на конденсаторах производится с помощью роторного вольтметра, построенного в лаборатории и имеющего линейную зависимость тока от напряжения.

При конструировании шунта, способного пропускать столь большие токи разряда, приняты меры к получению неискаженных записей быстро текущих процессов.

Построенный генератор импульсов может быть применен для изучения: мощного разряда (например, с целью рассмотрения вопроса о распределении в нем отдельных видов энергии: световой, звуковой и т. д.); термических воздействий искры (например, на металлические листы и проволоки), перехода импульсного разряда в дугу и пр.

Опыты показали, что запасенная в конденсаторах энергия расходуется в течение времени порядка 10^{-4} сек., в силу чего средняя мощность разряда достигает одного миллиона киловатт.



Данные о генераторах импульсных токов

Где установлен	Суммарная емкость, мкФ	Напряжение на конденсаторах, кВ	Запасаемая энергия, Дж	Полное сопротивление Z, Ом	Максимальный ток, кА	Описан:
1. Westinghouse	14,9	75	41 700	0,75	100	Беллаши
2. G E C	5,33	150	60 000	0,525	265	Мак-Икрон
3. G E C	144	10	7 200	0,064	120	Роатс
4. Siemens-Schuckert	48	52	65 000	0,140	330	Фойтцик
5 ЭНИН Академии наук СССР	34,3	$U_{исп} = 100$ $U_{раб} = 70$	166 500 85 000	0,140	700 500	Стекольниковым



Применение симметричных составляющих к трехфазным системам в свете теории Крона

Кандидат техн. наук, доц. В. Л. ФАБРИКАНТ

Московский энергетический институт им. Молотова

В 1918 г. Fortescue предложил метод симметричных составляющих. С тех пор этот метод вошел в повседневный обиход и является мощным орудием для решения ряда вопросов как расчетного, так и принципиального характера. В 1937—1938 гг. были опубликованы статьи Clarke [Л. 1, 2], предложившей новые составляющие α , β , 0. При решении ряда вопросов эти составляющие оказались более удобными, чем симметричные.

Возникает вопрос: в каких случаях целесообразно применение тех или иных составляющих и нет ли еще каких-либо новых составляющих, более удобных, чем предложенные? Общий анализ этого вопроса значительно облегчается предложенным Крон'ом методом унификации решения электротехнических задач.

Как показал Крон [Л. 4—6], закон Ома, справедливый для элементарной электрической цепи, справедлив и для сети любой сложности, составленной из таких элементарных цепей. При этом напряжение и ток являются векторами n -мерного пространства, а напряжения и токи отдельных цепей—их проекциями. Сопротивление такой сети выражается некоторым тензором. Крон указал, какими приемами может быть получено значение этого тензора сопротивления из сопротивлений отдельных элементов.

Этот Z -тензор может иметь различную матричную форму в зависимости от того, какие токи и напряжения приняты за координатные векторы. Введение составляющих представляет собой не что иное, как замену одних координатных векторов (фазных) другими (выбранными составляющими).

Нами был проанализирован вопрос о целесообразности введения тех или иных составляющих для рассмотрения явлений в трехфазных электрических системах, описанных относительно неподвижных осей. Анализ показывает, что следует отдельно рассматривать два типа задач, могущих встретиться в практике:

1. Конфигурация системы неизменна (или остаются неизменными определенные соотношения между элементами Z -тензора) и к ней прикладывается произвольная система напряжений.

2. Между приложенными к системе напряжениями сохраняются неизменные соотношения, но сама система в произвольной точке подвергается изменению (например, обрыв, короткое замыкание и т. п.).

Решение задач первого типа. Приведение Z -матрицы трехфазной системы к диагональной форме. При решении задач первого типа выбор составляющих полностью определяется требованием приведения матрицы сопротивления к диагональной форме. Диагональ-

ная форма матрицы, выражающей сопротивление системы, означает, что напряжение каждой составляющей зависит только от тока этой же составляющей. Следовательно, схема может рассматриваться для каждой составляющей отдельно в однолинейном виде. Если старые составляющие выражаются через новые уравнениями.

$$U_{CT} = C_u U_n, \quad (1)$$

$$I_{CT} = C_i I_n, \quad (2)$$

где U_{CT} , U_n , I_{CT} и I_n представляют n -мерные векторы, а C_u и C_i —тензоры, то Z -тензор в новой системе выражается через Z -тензор в старой системе равенством:

$$Z_n = C_u^{-1} Z_{CT} C_i. \quad (3)$$

Задача сводится к тому, чтобы найти значения C_u и C_i , удовлетворяющие условию, чтобы матрица Z_n была диагональной. Всегда можно найти такие значения C_u и C_i , чтобы при заданной матрице Z_{CT} матрица Z_n была диагональной. Трудность вопроса заключается в том, что матрицы C_u и C_i должны быть выбраны такими, чтобы превратить в диагональные не одну, а ряд матриц Z_{CT} , выражающих различные элементы системы.

Можно найти общий вид матриц C_u и C_i для случая, когда соотношение между собственными сопротивлениями с одной стороны, и сопротивлениями взаимной индукции,— с другой, не остается постоянным для разных участков сети (это условие практически всегда имеет место).

Если, кроме того, не все собственные сопротивления равны между собой и могут иметь различные соотношения для разных участков сети, либо это имеет место для сопротивлений взаимной индукции, либо для тех и других, то на матрицы C_u и C_i накладываются дополнительные условия, которые в некоторых немногих случаях могут быть удовлетворены. Иногда матрицы C_u и C_i не могут быть выбраны такими, чтобы обеспечить диагональную форму матрицы Z_n , но могут обеспечить квазидиагональную ее форму.

Различные, встречающиеся в практике, дополнительные условия и получающиеся для них матрицы C_u и C_i также были получены при анализе этого вопроса.

Инвариантность мощности—условие решения задач второго типа. Анализ, проделанный автором, показал, что одного лишь получения диагональной формы для матрицы Z_n недостаточно для решения задач второго типа. Должно быть соблюдено определенное соотношение между матрицами C_u и C_i для того, чтобы схемы для отдельных составляющих могли быть

соединены в общую эквивалентную схему, что необходимо для решения задач второго типа.

Это соотношение между матрицами C_u и C_i может быть выражено либо условием инвариантности мощности, либо несколько отличными от него условиями. Однако, отклонения от условия инвариантности мощности не дает дополнительной свободы выбора, т. е. не дает возможности удовлетворить какие-либо дополнительные условия, накладываемые на матрицу $Z_{ст}$, которые нельзя было бы удовлетворить при инвариантности мощности. Поэтому условие инвариантности мощности как унифицирующее является наиболее целесообразным, тем более, что для него имеется хорошо разработанный математический аппарат, предложенный Крон'ом.

При выборе составляющих следует учитывать, какие величины являются искомыми: мгновенные или эффективные. Соответственно следует сохранять инвариантной мгновенную или эффективную мощность.

Легко выводятся выражения матриц C_u и C_i для различных случаев, рассмотренных при решении задач 1-го типа. Частными случаями этих выражений являются матрица Fortescue (в форме, данной Concordia [7] и Крон'ом) и матрица Clarke (в форме, данной Concordia).

Литература

1. E. Clarke. Determination of Voltages and Current During Unbalanced Faults. GER, № 11, 1937.
2. E. Clarke. Problems Solved by Modified Symmetrical Components, GER, № 11—12, 1933.
3. E. W. Kimbark. Two Phase Coordinates. Trans. AIEE, 1939.
4. G. Kron. A Short Course in Tensor Analysis, 1942.
5. G. Kron. The Application of Tensors to the Analysis of Rotating Electrical Machinery, 1938.
6. G. Kron. Tensor Analysis of Networks, 1939.
7. Concordia. Relations Among Transformations Used in Electrical Engineering Problems. GER, № 7, 1938.



Электрический индикатор разрыва газопровода

Инж. А. Я. ВАЙНБЕРГ

Москва

Электрический индикатор разрыва газопровода может быть применен в ряде случаев для сигнализации и автоматического выключения газопровода при разрыве. В основу индикатора положен эффект увеличения электрического сопротивления нагретой проволоки, происходящий от уменьшения скорости потока, в который помещена проволока. Эффект этот обусловлен изменением степени охлаждения проволоки.

По закону Джоуля-Ленца количество тепла, выделяемого постоянным электрическим током в проволоке:

$$Q_1 = I^2 R T, \tag{1}$$

где A — тепловой эквивалент; I — электрический ток; R — сопротивление проволоки; T — время. Количество же тепла, отдаваемого проволокой, находящейся в потоке, выражается формулой Кинга. Для случая, когда поток направлен перпендикулярно оси проволоки и при условии

$$\frac{\pi C_p \omega D}{k} > 8 \cdot 10^{-3}, \tag{2}$$

формула Кинга имеет вид:

$$Q_2 = \left[1 + \left(\frac{2\pi C_p \omega D}{k} \right)^{1/2} k l (t - t_0) T \right], \tag{3}$$

где ω — скорость потока (ниже скорости звука); σ — плотность газа; C_p — его теплоемкость при постоянном давлении; k — теплопроводность; t_0 — температура газа; D и l — диаметр и длина проволоки; t — ее температура.

При установившемся режиме теплообмена $Q_1 = Q_2$ и

$$\omega^{1/2} = \frac{AI^2 R}{l(t - t_0) \cdot 2\pi k C_p D \sigma^{1/2}} - \frac{k}{[2\pi k C_p D \sigma]^{1/2}}, \tag{4}$$

откуда

$$R = \frac{4 \rho_0 l \left[(2\pi D k C_p \sigma \omega)^{1/2} + k \right]}{[\pi D^3 \{ (2\pi D k C_p \sigma \omega)^{1/3} + k \} - 4 A \rho_0 \sigma I^2]}, \tag{5}$$

где ρ_0 — удельное сопротивление проволоки при температуре t_0 и α — температурный коэффициент сопротивления проволоки.

Если два плеча уравновешенного моста Уитстона или Томсона заключены внутрь газопровода, то при разрыве газопровода сопротивление одного плеча вследствие изменения скорости газа изменится, и равновесие моста нарушится. Предполагается, что плечи моста в момент аварии находились в нагретом состоянии. Нарушение равновесия моста влечет за собой повышение тока в его нулевой цепи. Если в нулевую цепь включено реле сигнального устройства, то реле сработает и приведет в действие соответствующие механизмы.

В случае одинаковых сечений трубопровода в точках расположения сопротивлений плеч, следовательно, при одинаковых значениях скоростей потока в этих сечениях, параметры сопротивления плеч (ρ_0 , D , l и т. д.) также должны быть одинаковы. Кроме того должны быть одинаковы углы между осями проволок (сопротив-

лений) и направлением потока. Чтобы пульсации потока не нарушали нормального действия индикатора, необходимо применять реле времени.

Очевидно, электрический индикатор может применяться лишь в тех случаях, когда разность температур потока в сечениях расположения плеч моста достаточно постоянна.

Общая схема индикатора в случае моста Уитстона показана на рисунке.

Условия наивысшей чувствительности индикатора. Чувствительность индикатора определяется в первую очередь чувствительностью применяемого типа моста. Ограничимся случаем моста Уитстона. Наибольшей чувствительности моста Уитстона соответствует [Л. 1] равенство сопротивлений плеч моста:

$$R_1 \approx R_2 \approx R_3 \approx R_4, \quad (6)$$

и сопротивление нулевой цепи индикатора тока

$$r_g = \frac{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}{(R_1 + R_2 + R_3 + R_4)}. \quad (7)$$

Из основного уравнения моста Уитстона следует [Л. 2], что если чувствительность индикатора тока нулевой цепи моста I_g , то изменение сопротивления плеча, которое может констатировать мост:

$$\Delta R_2 = \frac{I_g}{I P_3} [r_g (R_1 + R_2 + R_3 + R_4) + [(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)]. \quad (8)$$

Теперь посмотрим, каковы условия получения наибольшего значения ΔR . Дифференцируя (5) по ω после элементарных преобразований и пренебрегая слагаемыми второго порядка малости, получаем:

$$\Delta R \approx - \frac{8 A I^3 \rho_0^2 l^2 [1 + \alpha(t - t_0)]^2 (2 \pi k D C_p \tau)^{1/2}}{\pi^2 D^4 \omega^{1/2} [(2 \pi k D C_p \tau)^{1/2} \omega^{1/2} + k]} \Delta \omega. \quad (9)$$

Из (9) следует, что изменение сопротивления плеча имеет знак, противоположный знаку изменения скорости, и что ΔR тем больше, чем больше l^3 , ρ_0^2 , l , α^2 , $(t - t_0)^2$ и $\Delta \omega$ и чем меньше D^4 и $\omega^{3/2}$. Кроме того, чувствительность тем выше, чем ближе угол между осью проволоки и направлением потока к 90° .

Вышеизложенное может служить базой для разработки методики расчета индикатора.

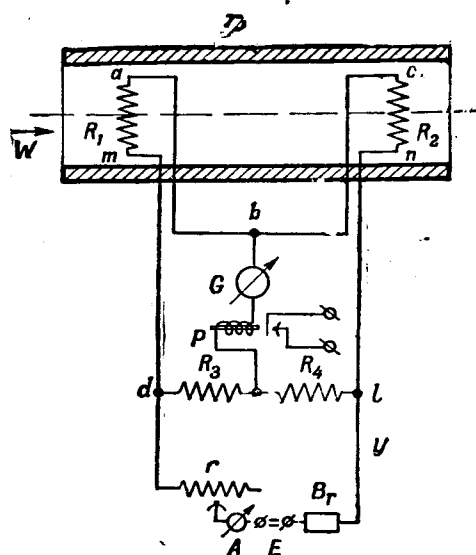


Схема индикатора.

D — трубопровод; W — вектор скорости потока; R_1 и R_2 — уравнивающие плечи моста; G — индикатор тока нулевой цепи; P — реле; r — реостат, регулирующий ток I ; A — измеритель тока; B_r — баррелер, или реле максимального тока; E — источник постоянного тока.

Расчет параметров. При выборе диаметра и длины проволоки сопротивлений плеч R_1 и R_2 моста приходится учитывать требования прочности. Материал проволоки должен быть химически инертным. Предпочтение следует отдать платиновой проволоке. Для платины марки „Экстра“ $\rho_0 \approx 10^{-5}$, $\alpha \approx 4 \cdot 10^{-3}$.

Предел тока обусловлен в первую очередь границей допустимого t_{\max} . Практика [Л. 3] показывает, что оптимум для платины является $t_{\max} \approx 300^\circ\text{C}$. Температура плавления платины значительно выше (1000°C), но при $t > 300^\circ\text{C}$ возникают нестабильные режимы, влекущие за собой непостоянство электрического сопротивления. Величина I определится из формулы (5), если положить в ней $R = \frac{4 \rho_0 l}{\pi D^2} [1 + \alpha(t - t_0)]$:

$$I = \left\{ \frac{\pi D^3 [(2 \pi k \tau C_p D \omega)^{1/2} + k] (t - t_0)}{4 A \rho_0 [1 + \alpha(t - t_0)]} \right\}^{1/2}. \quad (10)$$

Литература

1. Скрицкий. Электрические измерения, стр. 317, 1934.
2. А. Я. Вайнберг. Электричество, № 9, 1940.
3. Phil. Mag., стр. 81, т. 3, 1927.



Обсуждение статьи инж. Е. Я. Казовского

„ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ СОВРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРОМАШИНОСТРОЕНИЯ“

(*Электричество* № 7, 1945)

Член-корреспондент АН СССР
М. П. КОСТЕНКО

Статья не ограничена рамками одних теоретических вопросов электромашиностроения, а затрагивает также конструкции и производство машин. Инж. Е. Я. Казовский — один из ведущих инженеров завода «Электросила» осветил, главным образом, вопросы, связанные с номенклатурой производства крупного машиностроения, являющегося основной специальностью этого завода. Массовое и специальное машиностроение остались в статье незатронутыми, почему и необходимо получение откликов со стороны работников соответствующих заводов. В целом автор все же сумел охватить и поставить большие задачи в области электромашиностроения, поэтому представленный материал заслуживает, несомненно, внимания инженеров, интересующихся электромашиностроением. По отдельным вопросам могут быть сделаны следующие замечания и добавления.

Крупное электромашиностроение. В области *турбогенераторостроения* необходимо проанализировать вопрос о соответствии выпускаемых машин требованиям электрических систем, особенно в отношении их перегружаемости и $\cos \varphi$.

Нужно отметить, что выбор параметров машин большой мощности в отношении о.к.з. не удовлетворяет этим требованиям в части устойчивости при работе машин через линии электропередачи: некоторые из них спроектированы при слишком высоком $\cos \varphi$.

В области *гидрогенераторостроения* оказалось необходимым произвести ревизию существующих систем вентиляции, в особенности для зонтичных типов машин, так как тщательные тепловые и вентиляционные исследования обнаружили ряд заметных недостатков гидрогенераторов в этом отношении. Поэтому необходимо разработать более совершенные способы тепловых и вентиляционных расчетов, основанных на результатах опытных исследований или как на моделях, так и на выполненных установках. В области обмоток для гидрогенераторов нужно возможно больше применять тип волновых обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу, так как этот тип в значительной степени обеспечивает достижение грозоупорности машины при наилучшем использовании габарита в отношении места, занимаемого изоляцией.

Одновременно должны быть произведены работы по внедрению демпферных роторных обмоток, позволяющих расширить допуски на несимметрию нагрузки без добавочного нагрева ротора и перенапряжений на свободной или наименее нагруженной фазе, что поможет распространению метода пофазного выключения.

Электромашиностроение массового производства. В области массового производства *асинхронных двигателей* необходимо произвести большую технико-экономическую расчетную работу для установления разумных пределов экономии материалов не только в самих машинах, но и во всей энергосистеме в целом.

Опыт построения предельно использованных серий привел не только к снижению термической устойчивости машин и соответственно к уменьшению надежности их работы по сравнению с американскими машинами, но одновременно вызвал повышение затраты цветных металлов в остальной части системы — распределительных и передаточных линиях, генераторах и трансформаторах. В результате действительная народнохозяйственная экономия, особенно при условии учета снижения надежности, оказалась меньше, чем это могло казаться по непосред-

ственной экономии цветных металлов на самих электромашиностроительных заводах.

В отношении *теоретических вопросов, связанных с асинхронными двигателями*, нужно отметить необходимость значительного уточнения их *теплового расчета*, особенно в условиях кратковременных и повторно-кратковременных нагрузок. В этом отношении должны быть углублены методы расчета и экспериментального исследования постоянных времени нагревания, которые кладутся в основу при расчете повторно-кратковременных режимов работы, так как последние исследования обнаружили наличие не одной, а по крайней мере двух постоянных времени нагревания статорной обмотки.

В области *переходных режимов асинхронных двигателей* должен быть исследован вопрос о соответствии статических моментов и моментов при разбеге двигателей. Кроме того, должна быть разработана теория применения формул Клосса к двигателям Бушера и с глубоким пазом, имеющим более сложную зависимость скольжения от момента по сравнению с нормальным асинхронным двигателем, для которого выведены формулы Клосса.

Машины постоянного тока. Проектирование экономичной, надежной и совершенной серии машин постоянного тока является одной из труднейших задач электромашиностроения, поскольку в этой серии требуется чрезвычайно большое число модификации основного рассчитанного габарита. Вопрос весьма осложняется тем обстоятельством, что при модификации типа по скорости и нагрузочным токам изменяются не только его тепловые и вентиляционные характеристики, но также и коммутационные параметры. Так как машины постоянного тока имеют весьма большое применение в специальных морских установках, то одновременно требуется наибольшее снижение их габаритов и конструктивных весов без какого-либо снижения надежности.

Как правильно отмечено в статье Казовского, вопрос о переходных режимах в машинах постоянного тока требует дальнейшей углубленной теоретической и экспериментальной разработки.

Специальное электромашиностроение. В области специального электромашиностроения имеется огромное количество задач, которые должны решаться на соответствующих заводах, производящих это оборудование, в контакте с исследовательскими институтами и лабораториями. Больших теоретических разработок требует комбинированная работа значительного количества машин и агрегатов, входящих в современные электроприводы. Применение амплитуды и его видоизменений связано с надежной, устойчивой работой всей системы в целом; по этому вопросу о *свободных колебаниях* такой системы, вызванных процессами самовозбуждения амплитуды, является тоже одной из достаточно сложных теоретических и экспериментальных задач. Последние также возникают при работе сверхмощных установок по типу асинхронно-синхронных каскадов. Вопросы моделирования таких сложных систем в лабораторных условиях с точно моделированными параметрами, а также вопросы поведения этих установок до их практического осуществления, требуют в свою очередь серьезных теоретических и экспериментальных исследований.

В области специального электромашиностроения нужно отметить необходимость новых разработок: электро-механического оборудования для сварки, различных типов высокочастотных машин и высокоиспользованного оборудования повышенной частоты для самолетостроения.

Можно отдельно отметить необходимость внедрения

в специальные приводы трехфазных шунтовых и последовательных коллекторных двигателей. К сожалению, произведенная в этом направлении заводом «Электросила» большая расчетно-конструкторская работа, выразившаяся в разработке серии этих машин с рядом специальных модификаций, осталась нереализованной из-за войны. В настоящее время эти машины уже не входят в номенклатуру упомянутого завода, почему вопрос о восстановлении и продолжении этой работы остается открытым.

Для правильного решения теоретических вопросов электромашиностроения необходимо скорейшее восстановление и дальнейшее развитие исследовательских лабораторий на заводах и установление тесной их связи с научно-исследовательскими лабораториями как отраслевыми, так и высших школ.

**Доктор технических наук,
проф. В. К. ПОПОВ**

*Ленинградский политехнический институт
им. Калинина*

Статья Е. Я. Казовского достаточно широко охватывает большинство основных теоретических вопросов современного электромашиностроения. Однако материал дан, главным образом, в разрезе крупного машиностроения. Между тем количество мелких электродвигателей, применяемых в настоящее время в промышленности, транспорте и боевой технике, исключительно велико. Они обладают некоторыми своими собственными специфическими особенностями, которым наша техника до сих пор почти не уделяла должного внимания. Насколько велика роль мелких двигателей, свидетельствует тот факт, что в 1943 г. в США их было выпущено до $50 \cdot 10^6$ шт. Многие из этих двигателей работают в напряженном режиме и в неблагоприятных условиях окружающей среды.

В отношении крупных электромашиностроения тех или иных типов следовало бы дать указание о предельных достижимых их мощностях в зависимости от скорости.

Вопросам теории электропривода из всей статьи уделено всего несколько строчек, т. е. тем самым они оставлены в стороне. Говоря об электроприводе, автор указывает, что «изучение машин становится неотделимым от изучения схемы». В действительности, соответствующие задачи часто приходится рассматривать значительно шире и глубже. Как схема управления, так и электродвигатель должны изучаться в комплексе с рабочей машиной и по технологическим процессам.

Автор не придает достаточного значения современной технике непрерывного управления электрическими машинами и ограничивается лишь упоминанием об амплитудах. Следовало бы поставить вопрос шире и указать также на системы с роторолями, весьма распространенные и возникшие раньше систем с амплитудами. Не отмечена весьма существенная роль в управлении электрическими машинами обратных связей.

Такой чрезвычайно сложный и исключительно существенный вопрос, как теория следящего электропривода, также совершенно не упомянут в статье.

Между тем здесь много нерешенных задач, касающихся точности работы, зависимости точности от скорости, вопросы устойчивости в условиях нелинейности процессов, наиболее точных передаточных чисел.

Недостаточно охарактеризовано направление теоретических изысканий в области автоматического регулирования электроприводов и электрических машин вообще. Все эти вопросы приобрели в настоящее время исключительное значение, в частности, вследствие необходимости сопоставить электромагнитные решения задач с электронными и электрогидравлическими.

Вопросы нагрева, изоляции рассмотрены только в разрезе крупных машин. С точки зрения работы весьма

многочисленных электродвигателей чрезвычайно важно теоретико-экспериментальное решение задач нагрева для машин повторно-кратковременного режима работы.

Инж. И. Н. РАБИНОВИЧ

Завод «Электросила» им. Кирова

В опубликованной статье своевременно поставлен на обсуждение вопрос о теоретических работах, необходимых для развития современного электромашиностроения. Таких вопросов так много, что в рамках статьи нельзя достаточно полно охватить их всех.

Однако к ним следовало бы прибавить еще вопрос о теоретическом и экспериментальном исследовании *якорных обмоток машин постоянного тока*, в котором до настоящего времени нет полной ясности и еще не достаточно обобщен практический опыт. Сказанное подтверждается как тем, что ряд фирм до сих пор для якорей крупных машин постоянного тока применяют разные схемы обмоток (фирма Allis Chalmers и ХЭМЗ применяют «лягушечьи» обмотки, другие же фирмы — петлевые обмотки), так и тем, что некоторые авторы¹ настаивают на необходимости соблюдения более жестких условий симметрии для якорных обмоток, чем те, которые в свое время были сформулированы Арнольдом. В практике же современного электромашиностроения для крупных быстроходных машин постоянного тока с тяжелыми условиями коммутации применяют обмотки, не удовлетворяющие даже условиям симметрии Арнольда, которые считались обычно обязательными. Как на пример можно указать на одну из фирм, зарекомендовавшую себя в области изготовления машин постоянного тока на 4000 kW, 500 об/мин, 2300 kW, 750 об/мин и др. с двуххвостовыми однократно-замкнутыми петлевыми обмотками ($a=2 p$).

Приведенные факты показывают, что имеющаяся литература по обмоткам машин постоянного тока не только не отражает в достаточной степени современной практики, но даже в ряде случаев противоречит ей. Что же касается «лягушечьих» обмоток, то вопросы их коммутации, добавочных потерь и экономичности, а также вопросы проектирования, связанные с этими качествами, на наш взгляд, недостаточно теоретически разработаны.

Предельная мощность машины постоянного тока, как известно, ограничивается напряжением между соседними коллекторными пластинами и реактивной э. д. с. коммутации. Применение многоходовых обмоток («лягушечьих» и петлевых) позволяет при этом ограничении увеличить предельную мощность машины. Что же касается второй причины ограничения этой мощности — реактивной э. д. с., — то в этом направлении должны вестись исследовательские работы как в отношении изучения коммутационных качеств обмоток, так и в направлении применения пазовых демпферов, рекомендованных Дрейфусом и Треттином и с успехом примененных на практике для многих машин с тяжелыми условиями коммутации.

В заключение следует еще указать на два обстоятельства, которые являются важнейшими лимитирующими факторами для наших заводов на пути создания более экономичных и совершенных машин постоянного тока, а именно на отсутствие высококачественных угольных щеток и современных изоляционных материалов. В связи с этими недостатками машины постоянного тока с более или менее серьезными условиями коммутации работают только на импортных щетках. Что же касается изолированных проводов для многовитковых якорных обмоток, то до сих пор пользуются обычной хлопчатобумажной изоляцией, в то время как зарубежные фирмы уже в течение ряда лет применяют более совершенные изоляционные материалы (например, формекс). Преодоление отставания в указанных областях является первоочередной задачей технического совершенствования в электромашиностроении.



В Научно-техническом обществе Московского энергетического института им. Молотова

В НТО МЭИ за последнее время состоялся ряд докладов. В секции теоретической электротехники был заслушан доклад кандидата техн. наук, старшего научного сотрудника **Ф. В. Майорова** «Теория магнитоэлектрического тензодатчика и прибор для измерения деформаций и напряжений в деталях машин».

Миниатурные тензодатчики, разработанные докладчиком, весьма удобны в эксплуатации: они наклеиваются или припаиваются к испытуемой детали. Динамические колебания, улавливаемые тензодатчиком, записываются осциллографом, а статические деформации наблюдаются при помощи миллиметра.

Измерения приводятся при частоте порядка 50 000 Hz. Прибор дает возможность измерять деформации в пределах от 0,001 до 1%, обеспечивая точность измерений $\pm 2\%$.

В заключение доклада **Ф. В. Майоров** продемонстрировал на осциллографе работу одного из изготовленных им приборов, тензодатчик которого, наклеенный на камертон, фиксирует деформации.

В секции промышленной электротехники состоялся доклад доктора техн. наук, проф. **Н. В. Горохова** на тему «Электромашинная автоматика». Остановившись на целях и задачах автоматизации, содержащих получение искусственных характеристик машин, а также согласование характеристик, вопросы включения и выключения докладчик переходит к некоторым общим определениям. Он сначала рассматривает релейно-контакторную автоматику, осуществляющую коммутацию рабочих и управляющих элементов схемы, затем переходит к электрической машине, с ее естественными характеристиками, как элементу релейно-контакторной автоматизации.

Рассматривая собственно электромашинную автоматику, докладчик говорит о получении некоторых искусственных характеристик электрической машины путем использования конструктивных элементов и электромагнитных свойств самой машины.

Здесь в качестве путей решения задачи проф. **Н. В. Горохов** рассматривает: схемы соединения обмоток машины и комбинации из нескольких машин, изменение конструкции машин, специальное выполнение обмоток, компенсацию реакции якоря и использование коллектора. Наконец, остановившись на методах комбинации указанных способов, докладчик говорит об объединенной системе автоматизации, использующей и релейно-контакторную автоматику и электромашинную автоматику.

В заключение докладчик подчеркивает, что от машины в настоящее время взято далеко еще не все, что она может дать. Высказанные в докладе положения вызвали много вопросов и оживленные прения.

Доктор техн. наук, проф. **Г. Н. Петров** в своем выступлении, соглашаясь с докладчиком относительно расширения требований к электромашинам, возражает против противопоставления релейно-контакторной автоматизации и электромашинной автоматизации. Он указывает, что без релейно-контакторной автоматизации нельзя обеспечить надежное управление электрической машиной и что комбинация релейно-контакторной и электромашинной автоматизации даст результаты, которых никогда не удастся добиться от одной электромашинной автоматизации.

Доктор техн. наук, проф. **Д. П. Морозов** также полагает, что электромашинная автоматика не исключает и не может исключать релейно-контакторную автоматику. Все задачи нельзя (хотя это и желательно) решить в пределах одной машины. В ряде случаев необходимы комбинации электромашин, это и следует называть автоматикой. **Д. П. Морозов** отмечает также новую роль,

приобретаемую машиной в качестве бесконтактного регулятора.

Кандидат техн. наук, доц. **Ф. А. Горяинов**, отмечая правильную постановку вопроса относительно развития и широкого использования для целей автоматизации свойств самой машины, указывает на необходимость анализа схем в целом и неизбежного применения в этих схемах релейно-контакторной автоматизации.

Кандидат техн. наук, доц. **Л. С. Гольдфарб** высказывает ряд замечаний об оценке амплитуды, который следует рассматривать не как регулятор, а как усилитель, один из элементов схемы регулирования.

В радиотехнической секции состоялись два доклада. Первый доклад доктора техн. наук **Г. З. Айзенберга** на тему «Применение двухпроводных несимметричных линий в качестве антенн» был начат обзором применяющихся в настоящее время антенн для радиосвязи и радиовещания на средних и длинных волнах. Антенны этого типа могут быть разделены на две группы: низкие антенны и антифединговые антенны. Антенны первой группы для увеличения действующей высоты и увеличения коэффициента полезного действия часто снабжаются развитыми горизонтальными частями. Это приводит к удорожанию и ухудшению направленных свойств. Антифединговые антенны не могут использоваться в широком диапазоне.

Эти недостатки вызваны тем, что в современных антеннах при заданных размерах и рабочей волне получается вполне определенное, не поддающееся регулировке распределение тока. Если обеспечить возможность регулировки, то указанные недостатки могут быть устранены. Это возможно осуществить, говорит докладчик, путем применения антенн, выполненных из двухпроводных несимметричных линий.

Схемы выполнения антенн этого типа могут быть различны, например: антенна-матча верхнего питания и т. д. Анализ их работы произведен путем применения теории длинных линий, при анализе токов в земле применялась теория, предложенная Брауном. Экспериментальные исследования разработанных типов антенн показали правильность теоретических расчетов.

На основании этих экспериментов и теоретических работ, а также уже имеющегося опыта эксплуатации докладчик делает вывод, что антенны верхнего и среднего питания, являясь высокочастотными, могут быть рекомендованы в качестве типовых антенн на средних и длинных волнах. Разработанные схемы антенн с регулированием распределения тока представляют большой практический интерес и должны внедряться в эксплуатацию, вместе с тем разработанные схемы могут быть использованы для повышения эффективности имеющихся антенн.

Докладчик считает, что проделанная работа выявила возможности значительного усовершенствования средневолновых и длинноволновых антенн, но дальнейшие теоретические и экспериментальные работы в этой области, несомненно, выявят дополнительные практические возможности.

Второй доклад «Радиосвязь и радиовещание в Англии», состоявшийся в радиотехнической секции, был сделан **А. П. Щетинным** — главным инженером одного из управлений Наркомата связи СССР. Докладчик подробно рассказал о своих впечатлениях от посещения радиоприемных и радиопередающих станций, а также научно-исследовательских институтов Англии.

Доклад был прослушан с большим интересом и вызвал большое количество вопросов.

Кандидат техн. наук, доц. **Е. А. ВЕННИКОВ**



Новое тяговое электрооборудование

Завод «Динамо» им. Кирова закончил проектирование и приступил к организации производства новых видов электрооборудования для электрического подвижного состава.

Электрооборудование для моторо-вагонной секции на два напряжения 1 500 и 3 000 В. До 1941 г. заводом выпускалось электрооборудование для пригородных моторо-вагонных секций на напряжение 1 500 В. Секции этого типа не были приспособлены для работы при напряжении 3 000 В, принятом для магистральной электровозной тяги. Это обстоятельство препятствовало организации пригородного движения на основных электрифицированных участках с напряжением в контактной сети 3 000 В. Новое электрооборудование для моторных вагонов сможет эксплуатироваться как на участках с напряжением 1 500 В, так и 3 000 В.

Секция комплектуется из одного моторного и двух прицепных вагонов. Электрооборудование моторного вагона состоит из 4 тяговых двигателей мощностью по 170 кВт, с напряжением на коллекторе 1 500 В, двух-коллекторного динамомотора 1 500/3 000 В, генератора управления мощностью около 5 кВт, мотор-компрессора, с напряжением на коллекторе 1 500 В и комплекта аппаратуры управления. Переход с одного напряжения на другое производится специальным переключателем с дистанционным управлением, осуществляющим переход с параллельного соединения тяговых двигателей на последовательно-параллельное. Система управления — групповая с оригинальным пневматическим приводом системы проф. Решетова.

Тяговый двигатель оказалось возможным построить с напряжением на коллекторе 1 500 В и изоляцией от корпуса 3 000 В, при мощности 170 кВт с диаметром якоря 440 мм, в габаритах двигателя, примененного на моторных вагонах старого типа (при напряжении 750 В на коллекторе и 1 500 В от корпуса).

При конструировании тягового двигателя особое внимание было уделено его коммутационной стойкости, что было достигнуто применением высокого соотношения ампервитков дополнительных полюсов к ампервиткам якоря, специальной формой наконечника дополнительного полюса и благоприятным расположением щеткодержателей.

Электрооборудование для троллейно-аккумуляторного рудничного электровоза весом 7 т. Наряду с выпуском взрывобезопасного электрооборудования, предназначенного для аккумуляторных электровозов, работающих в шахтах, опасных по газу, и электрооборудования нормального типа для троллейных электровозов завод разработал конструкцию электрооборудования, предназначенного для работы в смешанных шахтах.

На участках шахты, опасных по газу, электровоз используется как аккумуляторный, а на участках не опасных по газу, — как троллейный. Переход с одного вида движения на другой осуществляется специальным переключателем, встроенным в контроллер.

Тяговое электрооборудование электровоза состоит из двух тяговых двигателей типа ДК-800-Б мощностью 5,2 кВт при напряжении 120 В (аккумуляторный режим) и 11,4 кВт при напряжении 250 В (троллейный режим). контроллера машиниста, максимального автомата, пусковых сопротивлений, соединительных штепселей, розеток и пантографа. Все электрооборудование, кроме пантографа, выполнено во взрывобезопасном исполнении.

Вес электровоза — около 7 т. Скорость электровоза при тяговом усилии около 1 000 кг, составляет при аккумуляторном режиме 3,8 км/ч, а при троллейном 8,3 км/ч. При тяговом усилии 1 080 кг аккумуляторный электровоз того же сцепного веса типа 1-АР развивает скорость 5 км/ч (при аккумуляторной батарее 50-ЭТТ-370).

Применение смешанного питания на вновь выпускаемом электровозе позволит уменьшить размеры аккумуляторной батареи (установить батарею 60-ЭТТ-250 взамен 50-ЭТТ-370) и несколько поднять общие эксплуатационные скорости, так как предполагается, что работа при троллейном режиме является преобладающей.

Дальнейшим развитием системы должна явиться схема, при которой на троллейном режиме производится одновременно заряд батареи. При подобной схеме эксплуатационные преимущества троллейно-аккумуляторного электровоза становятся весьма значительными, однако необходимо преодолеть ряд конструктивных трудностей, связанных с обеспечением безопасности.

Электрооборудование для тяжелого рудничного электровоза весом 14 т. В предвоенные годы заводом была выпущена опытная партия тяжелых рудничных электровозов, не нашедших, однако, применения для откатки в угольных шахтах из-за чрезмерно больших габаритов. В электровозах этого типа были применены пневматические тормоза и контактная система управления.

В разработанной заводом новой конструкции применена непосредственная система управления и служебное электрическое реостатное торможение. Снятие мотор-компрессора и элементов пневматического тормоза позволило существенно сократить габариты электровоза и сделать их приемлемыми для шахтных условий.

Новый электровоз весом 14 т оборудован двумя тяговыми двигателями мощностью в 46 кВт при напряжении 250 В. Скорость электровоза, соответствующая часовой мощности двигателей — 11,4 км/ч при тяговом усилии 2 800 кг.

Управление — непосредственное при помощи контроллера кулачкового типа. Целесообразность принятой схемы и эффективность электрического торможения должны быть проверены соответствующими испытаниями в эксплуатационных условиях.

Инж. А. А. РАБИНОВИЧ

Главный конструктор завода «Динамо» им. Кирова



25 лет научно-педагогической деятельности доктора технических наук, проф. Д. К. Минова

В Московском ордена Ленина энергетическом институте им. Молотова на факультете электрификации промышленности и транспорта 16 декабря 1946 г. под председательством доктора техн. наук, проф. *В. Е. Розенфельда* состоялось объединенное заседание кафедр основ электрической тяги и электролокомотивостроения, посвященное 25-летию юбилею научно-педагогической деятельности д-ра техн. наук, проф. *Дмитрия Константиновича Минова*.

Проф. Д. К. Минов родился в 1896 г. в Петербурге в семье рабочего. По окончании с медалью I Петербургской гимназии в 1914 г. Д. К. поступил в I Петербургский политехнический институт. Производственную работу Д. К. начал еще, будучи студентом в 1918 г., сначала слесарем в Главных мастерских Северо-западной железной дороги, а затем техником строительства гидроэлектрических станций на р. Свири. По окончании в 1920 г. Политехнического института Д. К. был оставлен при институте для подготовки к научной деятельности, где с 1922 г. был зачислен в аспиранты по кафедре электрической тяги, находившейся под руководством проф. *А. В. Вульфа*.

К этому периоду относятся первые научно-исследовательские работы. Д. К. «Влияние длины поезда при движении его по переменному профилю на время пробега и расход энергии», а также «Сравнение методов расчета тяговых сетей». Одновременно с научной работой Д. К. Минов вел также педагогическую работу в Политехническом институте. С 1923 г., продолжая научную и педагогическую работу, Д. К. принимал участие в работе Ленинградского государственного электромашиностроительного треста «Элмаштрест», а по образовании Государственного электротехнического треста с 1925 г. Д. К. был переведен в Москву, где работал в тресте «Электротягстрой», сначала инженером, а затем руководителем секции тяговых сетей и секции электрических железных дорог. Под руководством Д. К. была проведена, в частности, работа по подготовке электрификации пригородных железных дорог Московского узла. В период с 1929—1930 гг. Д. К. был выполнен первый в СССР проект контактного оборудования первой магистральной электрической железной дороги на Сурамском перевале, с одновременной разработкой ряда теоретических вопросов по контактной сети.

В последующие годы Д. К. руководит проектированием электроподвижного состава для Московского метрополитена им. Кагановича, занимается вопросом сравнения



систем электрической тяги и выбором типа электровоза для магистральных железных дорог. С 1933 г. Д. К. работает в отделе подвижного состава завода «Динамо» им. Кирова, в качестве руководителя группы исследований, главного инженера отдела, а затем консультанта завода. Под руководством Д. К. в период с 1934—1937 гг. на заводе были проведены работы по проектированию новых типов электроподвижного состава, в частности, электровоза одофазно-переменного тока, а также промышленных электровозов. Д. К. занимался также разработкой ряда проблемных вопросов, касающихся динамики электроподвижного состава. Этот вопрос в дальнейшем нашел отражение в его докторской диссертации.

Одновременно с производственной деятельностью Д. К. продолжает все время вести педагогическую работу, состоя с 1926 г. доцентом Института народного хозяйства им. Плеханова, а затем в МВТУ. С 1934 г. Д. К. руководит кафедрой электролокомотивостроения Московского энергетического института им. Молотова.

Д. К. был утвержден в ученом звании профессора в 1935 г., а в

1939 г. после защиты диссертации ему была присвоена ученая степень доктора технических наук.

В настоящее время кроме основной педагогической деятельности, на которую юбиляр полностью переключился с 1937 г., Д. К. работает по вопросам электрификации транспорта в секции по научной разработке проблем транспорта при Отделении технических наук Академии наук СССР.

После краткого очерка о жизни и деятельности проф. *Д. К. Минова*, сделанного кандидатом техн. наук доц. *Б. П. Петровым*, представители ряда организаций (МЭИ, редакции журнала «Электричество», Секции по научной разработке проблем транспорта Академии наук СССР, Технического совета наркомата электропромышленности СССР и др.) выступили с приветствиями.

В заключительной части торжественного заседания доктор технических наук, проф. *В. Е. Розенфельд* поделился воспоминаниями о совместной работе с юбиляром в течение многих лет, подчеркнул широкую эрудицию *Д. К. Минова* во всех вопросах, связанных с электрической тягой, и пожелал ему многих лет дальнейшей плодотворной работы в области электрификации транспорта.

Кандидат техн. наук Ю. М. ГАЛОНЕН



Замечания к учебнику проф. Е. В. Китаева

„ОСНОВЫ ТЕЛЕФОНИИ И ТЕЛЕФОННЫЕ СТАНЦИИ РУЧНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ“ Связьиздат, 1944.

Операционный метод исследования устанавливающих процессов, получивший за последние два десятилетия широкое распространение в различных областях техники, в настоящее время прочно вошел в учебную литературу электротехнических вузов.

Наряду с практическим применением его для решения частных задач прикладного характера трудами целого ряда математиков операционное исчисление получило, как известно, вполне строгое математическое обоснование и развитие на базе общей теории функциональных преобразований.

В советской литературе заслуга в части популяризации и дальнейшего развития операционного исчисления принадлежит В. С. Игнатовскому, А. И. Лурье, А. М. Эфросу, А. М. Данилевскому, Э. А. Мееровичу и др.

Применение операционного исчисления в академических условиях (с использованием операционных таблиц) представляет значительные преимущества в том отношении, что оно позволяет во многих случаях избежать громоздких математических выкладок, что особенно существенно с точки зрения наиболее рационального использования лекционных часов.

Из собственного опыта мне известно, что устанавливающие процессы в релейных схемах (при анализе влияний различных конструктивных факторов на время действия реле, условия искрогашения и т. д.) наиболее целесообразно проходить со студентами именно на базе операторных решений, так как они быстрее всего приводят к цели, освобождая от непроизводительной затраты времени на решение дифференциальных уравнений.

С этой точки зрения следует приветствовать подобный методический прием, примененный доктором техн. наук, проф. Е. В. Китаевым в последнем издании учебника „Основы телефонии и телефонные станции ручного обслуживания“.

К сожалению, однако, в этом, вообще говоря, весьма ценном учебнике допущены некоторые неточности в части, касающейся применения операционного метода к расчету цепей электромагнитных реле.

В § X, 14 (стр. 317), посвященном перенапряжениям при размыкании цепи, содержащей индуктивность, приводится операторное выражение для тока в искрогасительном контуре:

$$i = \frac{U}{r + \frac{1}{pC} + R + pL} \quad (X,122)$$

и, исходя из равенства $i \left(r + \frac{1}{pC} \right) = U$, делается вывод, что

$$p = -\frac{R}{L}. \quad (X,125)$$

Это создает у читателей неясность, поскольку p должно представлять переменную в области комплексных величин (соответствующую вещественному аргументу t в области действительных значений), а не некоторую фиксированную величину.

Далее, исходя из характеристического уравнения $r + \frac{1}{pC} + R + pL = 0$ (X,123), делается заключение, что

$$p = -\frac{1}{rC} \quad (X,126)$$

Получаемая при этом неопределенность вида $\frac{0}{0}$ рассмотрению не подвергается.

На основании сопоставления (X, 125) и (X,126) выводится расчетное условие

$$\frac{R}{L} = \frac{1}{rC}, \quad (X,127)$$

являющееся неточным, так как в действительности при произвольном значении r оно не обеспечивает равенства напряжений в месте размыкания и на зажимах батареи. В этом, в частности, легко убедиться, произведя проверку для начального момента размыкания контакта ($t = 0$), когда в силу закона инерции поля напряжение на зажимах конденсатора равно нулю, а ток в контуре

$$i(0) = \frac{U}{R}, \text{ откуда напряжение на контакте } \frac{U}{R} r \neq U.$$

Причина всех указанных недоразумений заключается в неточности исходного выражения (X,122), не учитывающего энергии магнитного поля, запасенной в индуктивности реле перед моментом размыкания контакта.

Фактически переход от дифференциального уравнения

$$i(R + r) + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t idt = U$$

к операторному, с учетом ненулевого начального условия, дает

$$i(p) = \frac{U + pLi(0)}{r + R + pL + \frac{1}{pC}}.$$

Очевидно, что равенство

$$i(p) \left(r + \frac{1}{pC} \right) = \frac{U \left(1 + p \frac{L}{R} \right) \left(r + \frac{1}{pC} \right)}{r + R + pL + \frac{1}{pC}} = U$$

удовлетворяется при

$$\frac{L}{RC} = R \text{ и } r = R.$$

Отмеченные выше недочеты желательно устранить в последующем издании этого фундаментального учебника.

Доктор техн. наук, проф. Г. И. АТАБЕКОВ



ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Гидроэлектрические установки Индии. *Power*, стр. 64—67, № 7, 1945.

Мощные потенциальные водные силы Индии оцениваются в 19,8 млн. кВт; из них существующие гидроэлектростанции развивают только 0,44 млн. кВт. Крупные реки Индии, — такие, как Инд, Ганг и низовья Брампутры, — весьма широки, относительно неглубоки и протекают по плоской территории, что не создает благоприятных условий для строительства плотин в целях получения электроэнергии. Режим стока таких рек очень неравномерен вследствие резко выраженной сезонности атмосферных осадков. Поэтому большинство существующих гэс сооружены в районе невысокой горной гряды Западные Гаты, располагающейся вдоль западного побережья полуострова. Гидростанции этого района снабжают электроэнергией крупные населенные пункты Бомбей, Гайдерабад и Бангалор. Гидроэлектростанции меньшей мощности, сооруженные в Гималаях на горных потоках Иелум, Сват и других, не могут получить важного промышленного значения, так как расположены они в экономически менее развитых районах.

В таблице приведены данные об основных гидроэлектростанциях Индии.

	Наименование и месторасположение гэс	Мощность гэс, тыс. кВт	Потребители гидроэнергии
1	Гэс г. Бомбея, Западные Гаты	183	Бомбей с окрестностями, Тана, Кальян, Великая Пуна
2	Гэс г. Майсора, р. Кавери	47	Майсор, Бангалор и 200 городов и селений
	В состоянии строительства	35	
3	Гэс Мадраса, Пайкара	24,9	Мадрас
	Меттур	17	
	Пананазим	28	
4	Гэс Кашмира, р. Иелум	15	Сринагар и Бараль-улла
5	Гэс в Соединенных провинциях, Гардвар	27,7	75 городов и ирригационные системы
6	Гэс Пенджаба, р. Уль	12	Амритсар и Лагор
	В состоянии строительства	118,6	Лудциана и 19 других городов

Развитие схемы использования р. Кавери (Майсор) позволит в 10 раз увеличить ее первоначальную мощность. Энергия этих гэс передается за 150 км в район золотых копей Колар.

В бассейне р. Ганг, не вдалеке от г. Бенареса, на магистральном канале сооружается гидроэлектрическая установка в 30 000 кВт, связанная с крупной ирригационной системой, что значительно повышает ее эффективность.

Капиталовложения в большую часть гидротехнических сооружений отнесены на ирригацию; кроме того, максимум расхода воды через канал и гидроэлектростанцию благоприятно совпадает с годовым пиком электрической

нагрузки, так как оба максимума имеют место в сезон наибольшего потребления воды для орошения.

Проведенное недавно обследование выявило шесть потенциальных гидроэнергетических участков: пять в Пенджабе и один в Соединенных провинциях на притоках Ганга. Мощность запроектированных гидростанций в Пенджабе составляет 750 000 кВт. Высокие плотины гидроэлектрических установок проектируются на реках Томс, Жирга, Сутлей, Бис и Ченах. Энергия этих гидростанций будет применена как для насосного орошения, так и в других целях. В Соединенных провинциях близ Найара после войны предполагается начать строительство мощной гидростанции с плотинной высотой 180 м.

В целом водные силы рассматриваются как основная энергетическая база электрификации Индии.

Кандидат техн. наук **Н. А. КАРАУЛОВ**

ПЕРЕДАЧА ЭНЕРГИИ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ

Cramer, Jones, Kent. Первые результаты эксплуатации межсистемной связи постоянным током высокого напряжения в США. *AIEE Tr.*, стр. 1413 — 1419, 1944.

В районе города Питтсбург с декабря 1943 г. работает несинхронная связь между районной сетью 60 Hz и заводской сетью 25 Hz. Связь состоит из двух блоков выпрямитель — звено постоянного тока 30 kV — инвертор общей мощностью 20 000 kW (см. Электричество, № 7, 1945). Эта установка обеспечила энергоснабжение новых цехов, пущенных в годы войны на одном из крупнейших металлургических заводов США, без расширения заводской электростанции 25 Hz.

Результаты первых 6 мес. эксплуатации нового вида межсистемной связи обсуждались летом 1944 г. в Американском институте инженеров-электриков.

Особо ценным оказался в данном случае несинхронный характер связи систем через звено постоянного тока высокого напряжения. Ввиду резких колебаний нагрузки (прокатные станы) частота в заводской сети колеблется в пределах от 22,5 до 26 Hz. В то же время в районной сети частота должна поддерживаться строго постоянной. Опыт эксплуатации установки подтвердил, что колебания частоты в сети 25 Hz совершенно не отражаются ни на частоте районной сети, ни на перетоке мощности между системами.

По заявлению представителей энергоснабжающей компании, в течение первых 24 h после ввода установки в опытную эксплуатацию имели место многочисленные жалобы потребителей на кратковременные посадки напряжения, вызванные, по видимому, частыми короткими замыканиями в инверторах и обратными зажиганиями в выпрямителях. В дальнейшем, после наладки системы управления и защиты, жалобы полностью прекратились. Как показывают регистрирующие приборы, короткие замыкания в инверторе происходят и в настоящее время (в среднем 2—3 раза в сутки), в основном за счет случайных пропусков зажигания в высоковольтных интроннах, служащих для выпрямления и инвертирования. Однако мгновенная сеточная защита и сеточное АПВ восстанавливают нормальный режим работы связи через промежуток времени от 0,04 до 0,4 сек. В этих условиях нарушения работы инвертора неощутимы для потребителей, присоединенных к питающей и к приемной сети.

Для проверки этого обстоятельства были произведены в порядке опыта 8 коротких замыканий в инверторе в течение 5 сек с равными промежутками. Дежурные на подстанциях сети заранее получили задание следить за

колебаниями накала электроламп. Тем не менее, многие из них вообще не обнаружили изменений накала, остальные же отметили слабо ощутимые колебания. Нарушений более длительного характера в работе установки не было.

Американская телефонная компания произвела замеры токов высших гармоник и мешающих влияний на телефонную связь, возникающих в сетях 25 Hz и 60 Hz при работе одного из блоков с полной нагрузкой — 10 000 кВт. При включении блока уровень мешающего напряжения повышается в питающей сети 60 Hz в 2 раза, а на инверторном конце — в сети 25 Hz — даже в 6 раз. Все же благодаря благоприятной конфигурации слаботочной сети заметных помех для телефонной связи в данном случае не было. При пуске второго блока число фаз установки было увеличено с 12 до 24. В результате мешающие влияния на линии слабого тока резко уменьшились, несмотря на удвоение передаваемой мощности.

Среднеэксплуатационный к. п. д. установки в целом, определенный с учетом потерь на двойную трансформацию, составил 94,88%. Это значение на 5% выше расчетного к. п. д. связи обеих сетей через мотор-генератор. Применение ионных вентилях вместо мотор-генератора для несинхронной связи сетей дает в данном случае годовую экономию энергии в 5 млн. кВт.ч.

Первые результаты эксплуатации установки для связи двух энергосистем постоянным током высокого напряжения подтвердили надежность и исключительную гибкость работы подобных установок.

Особый интерес представляют эти результаты для СССР, где предстоит в недалеком будущем осуществить целый ряд межсистемных линий электропередачи постоянного тока для связи энергосистем, удаленных друг от друга на большие расстояния.

Кандидат техн. наук Я. М. ЧЕРВОНЕНКИС

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ

H. L. Byrd and E. B. Rietz. Трехпериодный мощный масляный выключатель высокого напряжения. *El. Eng. стр. 160, № 4, 1945.*

С увеличением мощности электрических систем повышаются требования к бесперебойной работе транзитных линий электропередачи. Это особенно относится к линиям, образующим «спинной хребет» мощной системы. Условия работы выключателей, установленных на таких линиях, очень тяжелы, так как они должны удовлетворять требованиям повышенной отключающей способности, сокращенного времени отключения и сверхбыстрого повторного включения. Фирма ГЕС разработала новый тип масляного выключателя, который обладает следующими характеристиками: отключающая способность 3 500 000 кВА; время отключения — три периода; время повторного включения менее 20 периодов. Эти показатели достигнуты путем улучшения типа дугогасящих устройств и контактов, приводного механизма и механизма расцепления выключателя.

Дугогасящие устройства являются развитием конструкции, примененной в пятипериодном масляном выключателе той же фирмы. Хотя принцип гашения дуги масляным дутьем не изменился, но были полностью реконструированы расположение контактов и конструкция кожуха. Это улучшило действие потока масла и сократило длину дуги. Дугогасящее устройство состоит из толстостенной герколитовой трубы, внутри которой расположено два комплекта контактов. При действии контактов образуются две дуги: одна дуга создает давление и обеспечивает интенсивное дутье масла через канал другой дуги в выходные отверстия, имеющиеся в герколитовой трубе. Дуговые пластины сделаны из дугоустойчивого материала и расположены таким образом, что мощная дуга передвигается по ним с сокращением длины, чем достигается улучшение регулировки давления внутри дугогасящего устройства. В результате на всем диапазоне отключающей способности выключателя получается одинаково эффективное действие дутья. Параллельно с дугогасящими контактами смонтировано сопро-

тивление. Спротивление ограничивает перенапряжения, возникающие при отключении емкостных токов длинных линий передачи.

Привод выключателя пневматический, с электрическим управлением. При включении оперативная катушка втягивает сердечник, который удерживается в верхнем положении постоянным магнитом. Сердечник, двигаясь вверх, открывает вспомогательный вентиль, управляющий главным вентиляем. Поршень привода, не доходя до конца хода, вспомогательным контактом включает цепь маленькой катушки, которая смещает магнитный поток постоянного магнита, и сердечник отпадает, закрывая вентиль, управляющий главным вентиляем. Когда главный вентиль закрывается, открывается выхлопное отверстие, через которое воздух из цилиндра выходит в атмосферу. Катушка отключающей действует на защелку, удерживающую механизм выключателя во включенном положении.

При операции с действием свободного расцепления реле защиты замыкает цепь катушки свободного расцепления. Катушка свободного расцепления действует так же, как и первая, смещением магнитного потока. При повторном включении цепь оперативной катушки включения автоматически замыкается контактом, имеющимся на рычаге привода.

Механизм расцепления и передаточный механизм выключателя снабжены антифрикционными подшипниками, сильно уменьшающими трение в механизме. Уменьшение потерь на трение позволяет употребить легкие отключающие пружины и уменьшить энергию, потребную для их натяжения при включении. Благодаря этому уменьшаются силы, действующие в передаточном механизме, элементы механизма могут быть облегчены, их инерция уменьшается, чем достигается дальнейшее ускорение операции отключения.

Результаты испытаний показали, что при 138 кВ выключатель оказался способным отключить 5 500 000 кВА. Однако, для того, чтобы присвоить выключателю номинальный параметр 5 000 000 кВА, требуется дальнейшее его усовершенствование. Данные проведенных испытаний настоящего выключателя показывают, что выключатель на 5 000 000 кВА может быть построен, как только в этом встретится необходимость.

Кандидат техн. наук Г. С. БОРЧАНИНОВ

Philip Sporn and C. A. Muller. Десятилетний опыт эксплуатации сверхбыстродействующего автоматического повторного включения на линиях передачи высокого напряжения. *El. Eng. Tr., стр. 225—228, № 5, 1945.*

Центральная система Американской компании газа и электричества, в которой установлены выключатели со сверхбыстрым автоматическим повторным включением (АПВ), охватывает 7 штатов и включает 73 км линий 154 кВ, 4 500 км, — 132 кВ, 100 км — 110 кВ, 480 км — 88 кВ и 1 100 км — 66 кВ.

Большинство линий 132 кВ двойные, на металлических опорах. Совмещенный одночасовой максимум системы — 1 450 000 кВт. Подавляющая часть энергии вырабатывается на паровых электростанциях и небольшое количество — на гидроэлектростанциях. Имеется обмен энергии с соседними системами. Почти все линии транзитные и всякое отключение нарушает подокораспределение в сети, поэтому очень важна бесперебойность работы линий. Всего находится в эксплуатации 91 выключатель со сверхбыстрым АПВ на 43 линиях. За период с мая 1936 г. по ноябрь 1943 г. произошло 645 случаев перекрытий, 570 повторных включений было с удовлетворительным результатом, и 65 — с неудовлетворительным (10,2%), но в восьми случаях были устойчивые повреждения линии, при которых удовлетворительное действие АПВ невозможно.

Таким образом было 57 отказов (9%). Устойчивые повреждения были при падении опор, физическом повреждении опор, порче разрядников и при обрыве гирлянд изоляторов от гололеда. Интересно отметить, что в 104 случаях одновременного повреждения двух параллельных линий было 21 АПВ с неудовлетворительным результатом (20,2%). При этом был принят следующий метод.

подсчета: если после повторного включения только одна линия оставалась в работе, то это оценивалось 1/2, если же ни одна линия не оставалась в работе, то зачитывалась 1. Так, на двух линиях, работающих параллельно, наблюдалось 48 случаев повреждений обеих линий одновременно. При этом 13 1/2 действий АПВ было неудовлетворительным, а именно: в 19 случаях одна линия оставалась включенной и в 4 случаях обе линии повторно отключились.

Неудовлетворительная работа АПВ при авариях сразу на двух линиях объясняется плохим качеством релейной защиты: каскадное действие выключателей линий, когда один выключатель отключался мгновенно, а другой — через 8 периодов. В результате линия оказывалась без напряжения только 3—4 периода, что недостаточно для деионизации места повреждения. Были случаи отключения выключателя только на одном конце линии. На другой двойной линии неудовлетворительная работа АПВ вызывалась выпадением из синхронизма частей системы. На некоторых двойных линиях не было ни одного неудовлетворительного действия АПВ. Новые выключатели с временем действия 3 периода обеспечивают полное время АПВ в пределах 12 периодов, что улучшает результаты работы сверхбыстрого АПВ в системах.

Кандидат техн. наук Г. С. БОРЧАНИНОВ,

ЭЛЕКТРОННО-ИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

С. С. Herskind, Н. L. Kellog. Аварийные токи выпрямителя. *El. Eng.*, p. 145—150, № 3, 1945.

Аварийные токи могут иметь место или в результате обратных зажигания в ртутных выпрямителях или коротких замыканий на стороне выпрямленного тока. В соответствии с значениями этих токов должна быть предусмотрена защита, ограничивающая их величину и длительность, во избежание как повреждения самого ртутно-выпрямительного агрегата, так и нарушений в системе переменного и постоянного тока.

Определение величин аварийных токов мощных выпрямителей чрезвычайно существенно и для конструирования агрегатов в целом, и для выбора защиты и релейной аппаратуры. Поскольку полное определение величин токов при всех условиях невозможно, достаточно знать максимумы их мгновенных или установившихся значений.

В статье дается анализ аварийных токов при наиболее распространенной схеме соединений агрегата: треугольник — две обратные звезды с разделяющей катушкой. Токи рассматриваются для трех случаев: а) короткого замыкания на стороне выпрямленного тока; б) обратного зажигания на аноде одной звезды и в) обратного зажигания с подпиткой обратно горящего анода от других источников постоянного тока.

Для проверки точности выведенных автором формул им был проделан ряд опытов по определению токов короткого замыкания и обратных зажигания на мощных агрегатах (от 150 до 3 000 кВт при напряжениях от 240 до 3 000 В). Полученные опытные данные, как это следует из таблицы, оказались ниже подсчитанных.

Выпрямитель		Ток короткого замыкания, А		Ток обратного зажигания, А		Ток обратного зажигания при подпитке постоянным током, А	
кВт	В	Подсчет	Опыт	Подсчет	Опыт	Подсчет	Опыт
3 000	3 000	14 200	11 800	14 300	10 600	—	—
1 675	515	47 000	43 900	41 600	41 300	62 000	46 000

Причинами расхождения опытных и расчетных данных следует считать то, что при расчете пренебрегали как индуктивным и активным сопротивлениями междуфазного трансформатора, анодных проводов, шин постоянного тока и короткозамкнутой петли, так и насыщением сердечника силового трансформатора от постоянной составляющей аварийного тока.

Кроме того в анализе не учитывалось влияние регулирования фазы управляемого выпрямителя, зависящее от схемы возбуждения выпрямителя и длительности периода, в течение которого анод проводит ток. Следовало

также принять во внимание и падение в дуге выпрямителя, особенно при напряжениях 250—600 В.

Таким образом формулы хотя и дают приблизительные данные, позволяющие все же лучше понять поведение цепи во время аварий и предопределить величины токов с большей точностью, чем это было возможно ранее.

Инж. М. Д. ТРЕЙВАС

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ

S. B. Crary, R. M. Easley. Характеристики, применение и экономичность преобразователей частоты. *El. Eng.*, стр. 351—358, № 6, 1945.

В США к началу войны часть электроустановок с суммарной мощностью 725 000 кВт работала на переменном токе нестандартной частоты (в основном 25 Hz), снабжая энергией сталелитейные заводы и электрические железные дороги переменного тока.

Существующие преобразователи частоты делятся на преобразователи с синхронной и несинхронной связью. Основное различие между ними состоит в том, что при синхронной связи быстро меняющаяся нагрузка делится между обеими системами пропорционально их мощностям. При несинхронной связи эти изменения остаются в зоне их возникновения.

Авторы отмечают пять типов преобразователей: а) синхронно-синхронный, состоящий из синхронного двигателя 60 Hz и синхронного генератора 25 Hz с их индивидуальными возбудителями; б) индукционно-синхронный, состоящий из индукционной машины 60 Hz и синхронной машины 25 Hz, мощность которой составляет 0,58% мощности двигателя; обмотка ротора последнего соединена через трансформатор с системой 25 Hz, что обеспечивает электрическую и механическую связь между обеими системами; в) индукционно-синхронный преобразователь с регулируемой нагрузкой, состоящий из синхронного генератора и индукционной машины, возбуждаемой от регулируемого возбудителя, который в свою очередь возбуждается от преобразующего частоту возбудителя; г) электронный (с регулируемой нагрузкой) преобразователь, состоящий из выпрямительных и инвертирующих элементов; д) индукционно-синхронный преобразователь, состоящий из индукционного двигателя и синхронного генератора с возбудителем. Из перечисленных преобразователей два первые имеют синхронную, а остальные несинхронную связь.

Рассмотрение вышеуказанных типов преобразователей и попытка определить их начальную стоимость и потери потребовали сравнения всех преобразователей с одним из них, данные которого были приняты за единицу. В качестве такого преобразователя был взят синхронно-синхронный воздухоохлаждаемый агрегат, состоящий из 25 000 kVA, 13,8 kV, трехфазного, 25 Hz (cos φ=0,8), синхронного генератора и 23 500 kVA, 13,8 kV, трехфазного, 60 Hz (cos φ=0,9) синхронного двигателя; мощности сравниваемых преобразователей составляли 20 000 кВт каждого при тех же напряжениях — 13,8 kV.

Соотношения стоимостей и потерь, а также ориентировочные суммарные мощности отдельных типов преобразователей, установленных в США с 1928 г., приведены в таблице.

Типы преобразователей	Относительная стоимость	Относительные потери	Суммарная мощность, кВт
Синхронно-синхронный, воздухоохлаждаемый, трехфазный	1,000	1,0	585 000
То же, с водородным охлаждением, трехфазный	1,082	0,88	
То же, воздухоохлаждаемый, однофазный	1,205	—	
Индукционно-синхронный, с регулируемой нагрузкой	1,297	1,47	110 000
Индукционно-синхронный	1,354	—	15 000
Электронный (статический)	0,835	1,65	26 000

Инж. М. Д. ТРЕЙВАС

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ ТРАНСПОРТА

Прогресс пассажирского транспорта в США. *Diesel Railway Traction*, стр. 55, № 6, 1944.

В условиях войны существующие обтекаемые сверхскоростные поезда в США сыграли важную роль в выполнении пассажирских перевозок. Ни один из них не был снят с графика и лишь у очень немногих была незначительно снижена скорость. Высокие скорости движения и удобства сверхскоростных поездов были причиной того, что уже во время войны железнодорожные компании решили предпринять самое широкое развитие этого вида транспорта после войны. Наибольшую роль в этом успехе сыграли дизель-электрические поезда. Из 70 железнодорожных линий, по которым ходят сверхскоростные поезда, 52 линии обслуживаются дизель-электрическими поездами. Из 123 сверхскоростных поездов, работающих на всех этих линиях, 91 поезд ведут тепловозы, 2 поезда — электровозы и 30 поездов — паровозы. Из общей протяженности 131 000 км этих линий 100 000 км или 70% падает на долю тепловозной тяги.

Шесть дизель-электрических поездов, совершающих ночные рейсы между Чикаго и Денвером, покрывают за рейс по 1 620—1 740 км со средней по всему пути скоростью 96—99 км/ч. Дизель-электрический поезд Зефир-Берлингтон, совершающий утренние рейсы от Чикаго до Сент-Поль протяжением 685 км, проходит этот путь за 6 ч при 7 промежуточных остановках, делая в среднем 114 км/ч. Максимальный месячный пробег дизель-электрических поездов равен 48 500 км, в то время как рекордный пробег быстроходного поезда с паровой тягой составляет всего 36 500 км.

Кандидат техн. наук А. Д. СТЕПАНОВ

A. D. Eving. Заземление электрических цепей в самодвижущихся экипажах. *El. Eng., Tr.*, стр. 48—50, № 2, 1945.

Монтаж в самодвижущихся экипажах может быть выполнен по следующим системам: а) однопроводная система с обратным проводом в виде земли; б) двухпроводная система с двумя изолированными от земли полюсами; в) двухпроводная система с одним заземленным полюсом, причем заземление может быть в одной или нескольких точках, через сопротивление, предохранитель или реле или прямо через постоянное соединение.

Цели заземления: ограничение напряжения в цепях при грозах или под влиянием линий высокого напряжения; ограничение максимального потенциала по отношению к земле от нормального рабочего напряжения; облегчение сигнализации о повреждениях изоляции и нахождение мест повреждения; лучшая защита и в некоторых случаях упрощение монтажа.

Основное преимущество метода а): простота монтажа, низкая начальная стоимость, быстрое обнаружение повреждений. Недостатки — непостоянство сопротивления цепи, невозможность работы при повреждении изоляции на одном полюсе. Прохождение тока через подшипники может повредить их в результате электролиза.

Система б) дорога и затрудняет отыскание повреждений.

В троллейбусах возникает проблема электрических разрядов при прикосновении пассажиров. Они могут быть результатом утечки через корпус. Это практически устраняется, если сопротивление изоляции силовой цепи без двигателей не менее $8 \text{ M}\Omega$, каждого двигателя — не менее $10 \text{ M}\Omega$ и всей схемы в собранном виде — не менее $5 \text{ M}\Omega$.

Разряды могут возникать также вследствие статических зарядов. Статические заряды могут накапливаться внутри троллейбуса вследствие трения шерстяной одежды о резину. Эти разряды не опасны сами по себе, но их действия могут вызвать перемещения пассажиров, приводящие к увечьям. Наружные разряды испытываются пассажирами, стоящими на мостовой и прикасающимися к корпусу троллейбуса. Заряд может накапливаться вследствие трения ими об очень сухой бетон или асфальт. Так как корпус представляет большую емкость, удары при

разряде могут быть весьма чувствительны. Против этого применяется окрашивание шин проводящей краской, надевание на них цепей.

Рекомендуется выполнять монтаж следующим образом: все цепи троллейбуса, питаемые от контактного провода, монтируются по системе б. Цепи низкого напряжения (6—32 V) и малого тока на всяких экипажах, тщательно изолированные от высокого напряжения, могут быть смонтированы по системе а. Не следует применять систему а для грузовиков, перевозящих бензин, нефть и другие воспламеняющиеся и взрывчатые вещества. Все цепи, питающиеся от наружного источника, должны быть смонтированы по системе а или с. В цепях управления и сигнализации, имеющих общий обратный провод, можно этот провод заземлять на раму. Все цепи постоянного и переменного тока 64—120 V должны быть выполнены изолированными проводами, причем один из них может быть заземлен. Трехфазные цепи 220 V для кондиционирования воздуха не должны заземляться.

Кандидат техн. наук А. Д. СТЕПАНОВ

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

L. M. Moore. Фазовые инверторы в сельских электрических сетях. *El. World*, стр. 69, № 1, 1945.

В сельских электрических сетях США почти исключительно применяется трехфазная четырехпроводная система с многократным заземлением общего для высокого и низкого напряжений нулевого провода и однофазными ответвлениями на высоком напряжении. В связи с этим мешающие влияния на линии связи резко возрастают по сравнению с симметричными сетями. В сети Block River Electric Co (штат Миссури) напряжением 12 450/7 200 V линии связи (телефон, телеграф, сигнализация) шли параллельно силовой магистрали на удалении до 90 м. Общая длина участка сближения составляла 52 км, в том числе на участке длиной 8 км силовая линия имела четыре провода (три фазовых и нулевой), на участке длиной 16 км — три провода (два фазовых и нулевой) и на участке длиной 26 км — два провода (фазовый и нулевой). При этом мешающие влияния оказались значительно выше допустимых. Установка на питающей подстанции резонансных шунтов оказалась для наиболее длинной фазы неэффективной. Тогда на этой фазе, в начале двухпроводного участка были установлены два однофазных трансформатора мощностью по 75 kVA каждый и напряжением 7 200/2 300 V. Трансформаторы включались навстречу друг другу так (рисунок), что фаза тока после

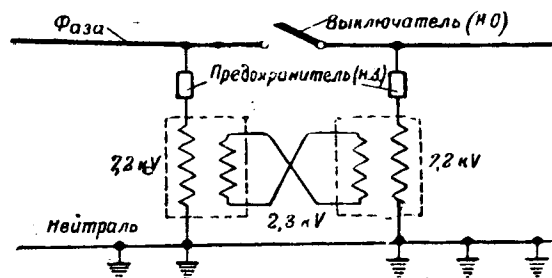


Схема установки двух однофазных трансформаторов в качестве фазового инвертора для снижения мешающих влияний сельских сетей на линии связи.

них поворачивалась на 180° . Тем самым мешающие влияния двух участков наиболее длинной фазы вычитались друг из друга и результирующее напряжение влияния оказалось в допустимых пределах.

Кандидат сельскохоз. наук И. А. БУДЗКО

По страницам технических журналов США*

Интересна динамика роста исследовательской работы в США за последние 25 лет. В 1920 г. только 297 американских фирм имели собственные исследовательские лаборатории. В них было занято около 7 400 специалистов; в 1927 г. количество лабораторий возросло до 1 000 и штат лабораторий достиг 19 000. В 1931 г. в США насчитывалось 1 520 промышленных лабораторий со штатом 33 000 чел., в 1938 г. — 1 722 лаборатории, в которых работало 43 300 специалистов; в 1940 г. — 2 350 фирм имели собственные лаборатории, в которых работало 70 000 исследователей.

Исследовательская работа крупнейших электротехнических фирм в 1944—1945 г. была в большой степени военнанизирована. Лаборатория фирмы Бел Систем вела в 1944—1945 гг. 55% работ для армии, 35% работ — для флота и 10% работ для государственного департамента научных исследований и разработок.

Исключительно большое развитие получили за последние годы исследовательские работы в химической промышленности. В 1937 г. 4,3% всей стоимости химической продукции в США шло на цели исследования.

Общая сумма затрат государственного департамента научных исследований и разработок США на военные и научные исследования за годы войны составила 472 298 799 долларов.

Опубликованы данные о влиянии высоты расположения на электрическую аппаратуру. Исследования, произведенные в горных районах США, показывают, что: 1) импульсная прочность частей в воздухе пропорциональна плотности воздуха; 2) ряд аппаратов, работающих на большой высоте, нуждается в специальном усилении изоляции.

Опыт подтверждает, что нагрев аппаратов ряда типов при повышении высоты увеличивается, несмотря на снижение окружающей температуры, так как с увеличением высоты повышение перегрева аппарата, вызванное уменьшением плотности воздуха, растет быстрее, чем снижение температуры окружающего воздуха.

Опубликованы результаты исследования инженерами фирмы Вестингауз электрического сопротивления изоляции и диэлектрической абсорбции в обмотках переменного тока крупных электрических машин. Результаты основаны на данных исследования 1 000 новых синхронных и асинхронных машин с мощностями от 1 000 л. с. и выше.

Исследовалось четыре вида изоляции: 1) микафолевая изоляция на бумажной основе в пазовой части и лакотканевая изоляция в лобовой части; 2) микафолевая изоляция со стеклянным волокном в пазовой части, микалентная — в лобовой; 3) непрерывная изоляция из микаленты, с пропиткой синтетическим лаком; 4) непрерывная изоляция микалентой на асфальтовых лаках.

Был установлен логарифмический характер зависимости сопротивления изоляции от температуры. Для слюдяной изоляции на синтетических лаках было установлено десятикратное изменение сопротивления при изменении температуры с 25° до 75°С. Для непрерывной изоляции микалентой на асфальтовых лаках это отношение оказалось равным 14.

При измерении сопротивления изоляции образцов, выполненных на асфальтовых лаках, оказалось, что зависимость сопротивления изоляции от температуры при малых промежутках времени приложения испытательного напряжения (1—10 мин) имеет характер, отличный от характера кривых, соответствующих длительно приложенному напряжению. Вместо логарифмической зависимости в этом случае наблюдался минимум и максимум при температуре порядка 50—70°С. Сопротивление изоляции увеличивается с увеличением длительности времени приложенного напряжения, что, как известно, вызвано явлением диэлектрической абсорбции.

На основании исследований было установлено, что сопротивление изоляции, замеренное через время t после

приложения напряжения, пропорционально сопротивлению изоляции, замеренному через одну минуту после приложения напряжения, и времени приложения напряжения, взятому в степени n , где n — величина, меняющаяся в довольно широких пределах. Предполагается, что наклон кривой абсорбции, который может быть охарактеризован отношением величин сопротивлений через 10 мин после приложения напряжения к величине сопротивления через 1 мин

после приложения напряжения $\frac{R_{10}}{R_1}$, характеризует

состояние изоляции. Чем круче этот наклон, тем более сухой можно считать изоляцию. При температуре 25°С отношение $R_{10} : R_1$ в зависимости от состояния изоляции колеблется в пределах от 1 до 6.

Конкордия и Магиннис (фирма GEC) провели помощью интеграла исследование зависимости продольного переходного и сверхпереходного реактивного сопротивления синхронной машины, определяемого из осциллограмм внезапного короткого замыкания, от ряда факторов: отношения сверхпереходных реактивных сопротивлений в прямой и поперечной оси $\frac{x''_d}{x''_q}$, фазы напряжения в момент короткого замыкания, неодновременности включения всех трех фаз.

Оказалось, что указанные факторы имеют существенное влияние на исследуемые величины.

Все более широкое распространение получает диэлектрический нагрев полупроводников и изоляционных материалов. Нагрев производится в электростатических полях, пульсирующих с частотой 3—30 млн. Hz; физической причиной диэлектрического нагрева является молекулярный гистерезис в материале при переменном электрическом поле.

Большое применение нашел высокочастотный нагрев для изготовления деталей из дерева. Раньше для производства фанеры применялся столярный клей; прессование производилось под давлением 7—14 кг/см², причем толщина дерева, закладываемого между нагреваемыми поверхностями, не превышала 100 мм. Время сушки составляло 2—4 ч.

После изобретения новых синтетических клеящих веществ стало возможным получение влагостойкой фанеры. Широко применяется при этом диэлектрический нагрев помощью агрегатов с мощностью в 300 kW. Сушка продолжается 12—15 мин. В результате производительность прессы увеличилась до 10 раз.

Из дерева с помощью высокочастотного нагрева и клея делают ламинированные балки и другие изделия с сечением порядка 300 на 600 мм, с длиной до 18 м. Высокочастотный нагрев также применяется при получении твердого дерева. Дерево пропитывается смолой и сжигается до половинной толщины при давлениях порядка 150—210 кг/см², подвергается при этом высокочастотному нагреву. В результате подобной обработки получается плотное дерево с крепостью стали, с поверхностью, не требующей обработки. Новый материал может обрабатываться на станке и полироваться.

Высокочастотный нагрев применяется также при изготовлении ламинированных деталей из бумаги, асбеста, шерсти, хлопка, стеклянного волокна, в сочетании с различными смолами. Некоторые из новых пластмасс имеют прочность, превышающую прочность алюминия и стали. Диэлектрический нагрев оказался весьма эффективным средством при сушке, в которой требуется освобождение от влаги ниже 5%, что всегда было затруднительным. При содержании влаги выше 15% обычные методы сушки оказываются более экономичными.

Стоимость установки для диэлектрического нагрева еще относительно велика. Она колеблется в пределах от 1 500 долларов за агрегат в 1 kW до 200 долларов на 1 kW для агрегата в 300 kW (без вспомогательного оборудования).

При новом процессе автоматического лужения жести, разработанным фирмой Вестингауз, скорость движения листа достигает 305 м в минуту и выше. Для прогрева оло-

* Заметки печатаются в сборниках завода „Электросила“ им. Кирова.

ва применяются высокочастотные ламповые генераторы с частотой порядка 200 тыс. Hz. Для индукционного прогрева более толстых деталей применяют более низкие частоты, получаемые от вращающихся машин. Наилучшей практической частотой, получаемой от вращающихся машин, считают 10 000 Hz.

Помощью индукционного нагрева прогревают детали шириной в 1,2 ÷ 1,5 м.

Метод высокочастотного индукционного нагрева по мнению Роберта М. Бекер (лаборатория Вестингауз) экономичен для нагрева стали до температуры 700—800°C. Нагрев стали до более высоких температур, нагрев меди алюминия и других цветных металлов путем высокочастотной индукции неэкономичен вследствие малой магнитной проводимости материала.

Для моделирования ряда физических и технических задач все большее применение находят эквивалентные электрические схемы. При подобном моделировании часто возникает потребность во включении отрицательных полных сопротивлений. В настоящее время разработаны электронные схемы, создающие отрицательные полные сопротивления. В июльском номере журнала «Electronics» за 1945 г. описаны подобные схемы, представлены основные уравнения, определяющие пределы и район устойчивой работы системы. Для оценки устойчивости используется критерий Найквиста.

Значительно расширился диапазон частот, применяемых в проводной связи за последние годы. Обыкновенная проводная телефонная связь использует частоты от 3 до 30 тыс. Hz, при наличии 6 каналов. При этом половина каналов используется для связи в прямом направлении, половина — для связи в обратном направлении.

Обычная переговорная речь требует для своей передачи диапазона частот 200—3 000 Hz, поэтому 4 провода (2 пары) могут быть использованы, как три нормальных двухсторонних канала на каждую пару проводов, один канал, работающий на звуковых частотах, на пару проводов, и один канал типа фантом, использующий по одному проводу разных пар, для звуковых частот. Это дает девять переговоров с помощью двух пар проводов.

До последних лет частота в 30 тыс. Hz была наивысшей для передачи по проводам. Повышение используемых

в проводной связи частот затруднительно вследствие увеличения потерь мощности и трудности устранения взаимных помех при повышении применяемых частот. С другой стороны, увеличение диапазона частот позволяет увеличить количество каналов одновременной передачи.

Недавно в США были разработаны две системы проводной связи, использующие частоты свыше 30 тыс. Hz. Система К, предназначенная для кабелей, дает 12 каналов с частотами от 12 тыс. до 60 тыс. Hz. В новой системе применены две пары проводов — одна для переговоров с востока на запад, другая — с запада на восток. Вторая система — J — предназначена для воздушных линий и использует частоты от 36 тыс. до 140 тыс. Hz. При разнице в частотах между каналом в 4 тыс. Hz система позволяет иметь 24 канала на каждую пару проводов — 12 одного направления и 12 второго направления. Используя добавочные каналы типа описанных выше, можно получить 16 двухнаправленных каналов на каждую пару проводов.

С повышением применяемых частот требуется более частая установка усилителей. Если бы не было поставлено усилителей по пути телефонной линии Бостон — Сан-Франциско, то для получения сигнала, передаваемого из Бостона в Сан-Франциско, в Бостоне нужно было бы установить передатчик с мощностью, которая больше мощности всей энергии, посылаемой солнцем на землю. Кабельная система К требует установки усилителей через каждые 26 км.

Большинство усилительных станций работает автоматически и требует только от времени до времени осмотра наблюдающего персонала. Так как изменения погоды, температуры и ветра меняют сопротивление линии, то это требует изменения степени усиления в различных пунктах линии. Поэтому один из каналов используется как вспомогательный канал для автоматического управления усилением.

В 1945 г. намечалось развить сеть коаксиальных кабелей (фирм Бел Систем) до общей протяженности в 2 000 миль, из них $\frac{3}{4}$ заложены в землю. В 1944 г. фирма сообщила, что она намечает на ближайшие пять лет развитие системы коаксиальных кабелей до 6—7 тыс. миль. Коаксиальные кабели должны найти применение как для телефонной связи, так и для телевидения.

Инж. Е. Я. КАЗОВСКИЙ

Информация завода «Электросила» им. Кирова

К автореферату «О формулах нагрева двигателей и динамики электропривода»

В дополнение к автореферату канд. техн. наук Л. Б. Гейлера (Электричество, № 1, 1946) помещается численный пример, опущенный при опубликовании автореферата по техническим причинам.

У современных асинхронных двигателей, особенно, малых мощностей, постоянная времени нагрева T_t может составлять небольшую величину, порядка 15—30 мин и быть соизмеримой с продолжительностью T цикла работы двигателя или отдельных частей цикла (например, приводы центрифуг, мешалок, некоторых видов металлорежущих станков и т. п.). В таких случаях пользование формулой среднего квадратичного момента (мощности) становится уже недопустимым, и следует обязательно прибегать к выражению (12), которое может быть с небольшим приближением преобразовано:

$$P_e \cong \sqrt{P_k^2 - \sum_1^k (P_k^2 - P_{k-1}^2) e^{-A(\tau_k - \tau_{k-1})}}. \quad (13)$$

и применение которого показано для графика нагрузки изображенного на рисунке.

Пример. Асинхронный двигатель работает по графику (рис.). Постоянная нагрева двигателя $T_t = 30$ мин. По формуле средней квадратичной мощности

$$P_e = \sqrt{\frac{5^2 \cdot 70 + 3^2 \cdot 50 + 10^2 \cdot 20}{70 + 50 + 20}} = 5,48 \text{ kW}.$$

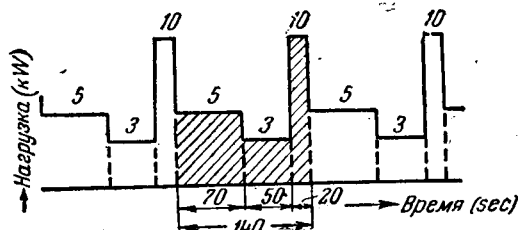
Согласно же (13) имеем:

$$P_e = \sqrt{10^2 - (10^2 - 3^2) e^{-\frac{20}{30}} - (3^2 - 5^2) e^{-\frac{70}{30}} - (5^2 - 0) e^{-\frac{140}{30}}} = 7,2 \text{ kW}$$

Разница

$$\Delta = \frac{7,2 - 5,48}{7,2} 100 = 24\%.$$

Формула средней квадратичной мощности дает здесь заниженное на 24% значение и по условиям данного примера вообще не может применяться.



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ НКЭС СССР

Москва, Шлюзовая набережная, 10

**Продолжается подписка на 1946 г. на журналы:
с первых январских номеров (без лимита)**

„ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“

Орган Академии наук СССР,
НКЭС СССР и НКЭП СССР

Основан в 1880 г. # 12 номеров в год

Подписная цена на год 96 руб.

Журнал рассчитан на инженеров и научных работников в широкой области научного исследования и практического применения электричества.

„Электрические станции“

Орган НКЭС СССР

Год издания 17 # 12 номеров в год

Подписная цена на год 96 руб.

Журнал рассчитан на инженерно-технический персонал электростанций и сетей, проектирующих и производственных организаций, заводов, изготавливающих электрооборудование, работников НИИ и студентов вузов.

„Гидротехническое строительство“

Производственно-технический и экономический
журнал НКЭС СССР

Год издания 15 # 12 номеров в год

Подписная цена на год 48 руб.

Журнал рассчитан на инженерно-технический персонал строительства и эксплуатации гидроэлектростанций и гидротехнических сооружений, проектно-исследовательских организаций, научно-исследовательских институтов и на студентов вузов.

„Торфяная

промышленность“

Орган НКЭС СССР

Год издания 23 # 12 номеров в год

Подписная цена на год 48 руб.

Журнал рассчитан на руководящих работников, инженеров, техников и передовых рабочих торфяной промышленности.

„ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА“

Орган Госинспекции по промэнергетике
и энергонадзору при НКЭС СССР

Год издания 3 # 12 номеров в год

Подписная цена на год 48 руб.

Журнал рассчитан на инженеров и техников, работающих в области промэнергетики, энергетиков, технологов цеха, заводов, главков наркоматов.

„За экономию

топлива“

Орган Главснабгудля при СНК СССР

Год издания 3 # 12 номеров в год

Подписная цена на год 96 руб.

Журнал рассчитан на руководящих работников, инженерно-технических работников предприятий промышленности и транспорта и квалифицированных рабочих.

ПОДПИСКА ПРИНИМАЕТСЯ СОЮЗПЕЧАТЬЮ И ВСЮДУ НА ПОЧТЕ

*Подписку можно направлять также по адресу — Москва,
Шлюзовая набережная, 10 — Госэнергоиздат.*

Расчетный счет № 188002 в Красногвардейском отделении Госбанка.