

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1949



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

10

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

10  
1949  
ОКТЯБРЬ

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

## СОДЕРЖАНИЕ

А. Глазунов — Пути технического развития и реконструкции электрических сетей больших городов Советского Союза	3
П. И. Богдашkin — О перспективах развития сельской электрификации Украинской ССР	8
Р. И. Караев — Теория открытой электрической дуги большой мощности	14
А. И. Долгинов — Индуктированные напряжения на линиях электропередачи	19
В. Н. Андрианов — Устойчивость синхронного генератора при работе от ветродвигателя на мощную сеть	26
В. Р. Секторов — Режимы работы и типы ветроэлектрических установок для сельских районов	33
И. М. Камень — Работа асинхронного двигателя при несимметричных схемах и сопротивление нулевой последовательности	37
Р. Л. Аронов — Проектирование пусковой диаграммы	42
Л. М. Шильдинер — Аналитический метод учета размагничивающего действия поперечной реакции якоря при больших перегрузках	46
И. Я. Лехтман — К вопросу об инерционности серводвигателей постоянного тока с независимым возбуждением	49
И. Н. Кротков — Чувствительность электрических измерительных цепей	55
В. А. Полевой — Схемы замещения трансформаторов с расщепленными обмотками	59
В. А. Балагуров — Последовательный конденсатор во вторичной цепи магнето	64
Б. М. Струнский — Сравнение двух схем короткой сети для электропечей с прямоугольными ваннами	68
В. Г. Комар и Л. И. Сажин — Автоматическое регулирование и стабилизация света в кинотеатрах с помощью селеновых выпрямителей и дросселей насыщения	72
А. А. Соколов — Электронные усилители постоянного тока	74
<b>ХРОНИКА</b>	
Профессор В. Н. Степанов	85
Профессор С. А. Бургучев	85
Всесоюзная научно-техническая сессия по вопросам применения электроэнергии в сельскохозяйственном производстве	86
В Ленинградском электротехническом институте им. Ульянова (Ленина)	87
<b>Анатолий Яковлевич Буйлов</b>	89
<b>БИБЛИОГРАФИЯ</b>	
Я. С. Теплицкий — Справочник по электрификации сельского хозяйства	90
Л. П. Подольский и П. Ф. Соловьев — Учебные таблицы В. И. Корольковой и Я. К. Розовского „Техника безопасности в электроустановках“	91
С. И. Зилитиневич и И. В. Шаров — Книга Г. Дж. Рейх „Теория и применения электронных приборов“	93
Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике.	95



**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

Доктор техн. наук, проф. **Г. Н. Петров** (редактор), академик **А. И. Берг**,  
доктор техн. наук, проф. **Ю. В. Буткевич**, доктор техн. наук, проф. **А. А. Гла-  
зунов**, член-корр. АН СССР **М. П. Костенко**, академик **В. Ф. Миткевич**,  
канд. техн. наук **И. А. Сыромятников**, член-корр. АН СССР **М. А. Шателен**

**Адрес редакции:** Москва, Б. Черкасский пер., д. № 2, тел. К 4-24-80.

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

**Адрес для телеграмм:** Москва Электричество

# Пути технического развития и реконструкции электрических сетей больших городов Советского Союза

Доктор техн. наук, проф. А. А. ГЛАЗУНОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

Электрическую сеть большого города Советского Союза нельзя выполнить экономически целесообразной, если принять для питательной и распределительной сетей и высшее напряжение  $6 \div 10$  кв. При таком построении сети неизбежны большой расход цветного металла и сложная схема сети. При ограниченном вложении цветного металла в городскую сеть будут большие потери мощности и энергии и дополнительное усложнение схемы сети.

Экономически целесообразную схему сети большого города можно получить только с применением глубоких вводов  $35 \div 110$  кв. Число вводов 110 кв должно быть относительно небольшим, что объясняется следующими новыми причинами:

1. Создание глубоких вводов воздушными линиями, как правило, неосуществимо из-за невозможности проложить линии 110 кв по улицам города. Кроме того, прокладка воздушных линий 10 кв по улицам нежелательна по эстетическим выражениям и по условиям безопасности жителей. О осуществление глубоких вводов 110 кв кабельными линиями сопряжено с очень большими затратами. Стоимость кабельной линии 110 кв около 15 руб. за 1 км на 1 передаваемый киловаттампер, что примерно в  $5 \div 6$  раз дороже, чем при передаче по воздушной линии.

Обсуждаются актуальные вопросы технически и экономически целесообразного выполнения электрических сетей в новых больших городах Советского Союза и реконструкции существующих городских сетей. Отмечается целесообразность широкого применения напряжения 35 кв для городских сетей высокого напряжения и намечаются наиболее рациональные типы сетей на это напряжение; указывается на важность работ по внедрению замкнутых сетей низкого напряжения. Ставится под сомнение целесообразность применения напряжения 380/220 в для сетей низкого напряжения взамен сети 127 в. Формулируются требования к электропромышленности, в частности по выпуску трансформаторов с повышенным к. п. д. и кабелей 35 кв с повышенной надежностью в эксплуатации при пониженной стоимости. Статья помещается в порядке обсуждения и дискуссия по ней будет печататься в ближайших номерах журнала.

2. Резкое возрастание стоимости оборудования сети при дроблении подстанций с первичным напряжением 110 кв приведет к необходимости строительства мощных понизительных подстанций. Последнее повлечет за собой удорожание питательной сети  $6 \div 10$  кв и усложнение схемы этой сети.

При существующей шкале стандартных напряжений ближайшим низшим напряжением яв-

ляется 35 кв. По нашему мнению, это напряжение должно быть использовано при развитии и реконструкции электрических сетей больших городов Советского Союза. При напряжении 35 кв питательная сеть может быть выполнена кабельной при стоимости около 4 руб./км · ква. Таким образом, передача энергии по кабельной сети с напряжением 35 кв примерно в 4 раза дешевле, чем по кабельной сети 110 кв.

Удельные нагрузки ( $\text{kvt}/\text{km}^2$ ) в реконструируемых больших городах резко возрастают за счет увеличения этажности зданий, расширения круга применения электроэнергии и т. п. Удельные нагрузки будут достигать нескольких тысяч  $\text{kvt}/\text{km}^2$ . Каждый 20—30-этажный дом будет потреблять мощность порядка 1 000 квт и более. Питание отдельных домов и районов со столь высокой плотностью нагрузок линиями  $6 \div 10$  кв, проложенными от источников питания, находящихся в нескольких километрах от них, не может считаться целесообразным. Потребуются

опорные подстанции. Подстанции 35/6  $\div$  10 кв значительно дешевле, чем подстанции 110/6  $\div$  10 кв.

При правильной структуре сети большого города введение напряжения 35 кв при питании от станций, расположенных вне города, сопряжено с одной дополнительной ступенью трансформации напряжения. Питание сети от электростанций, находящихся в черте города, потребует двух дополнительных ступеней трансформации напряжения. Соответствующие расчеты показывают, что введение дополнительных ступеней трансформации энергии связано со значительными потерями электроэнергии, а следовательно, и с увеличением эксплуатационных расходов.

Анализируя составляющие эксплуатационных расходов, при введении в сеть крупного города напряжения 35 кв, легко убедиться, что увеличение эксплуатационных расходов во многом определяется потерями электроэнергии в трансформаторах. Однако, указанное обстоятельство ни в коем случае не может служить препятствием к внедрению напряжения 35 кв, в сети больших городов Советского Союза. Необходимо поставить перед нашей электропромышленностью новые, повышенные требования в отношении изготавляемых трансформаторов.

Ряд обстоятельств привел к тому, что наши трансформаторы запроектированы с относительно большими потерями мощности. Например, трансформатор мощностью 10 тыс. ква с обмоткой высшего напряжения 35 кв имеет потери мощности при номинальной нагрузке 1,2%. Такие высокие потери мощности в трансформаторах предопределяют то, что при технико-экономическом выборе трансформаторов получается более выгодным устанавливать трансформаторы большей мощности, чем это требуется по нагрузке. Приведенные соображения указывают на явно ненормальное положение с трансформаторостроением. В настоящее время, при использовании лучших сортов стали и снижения плотностей тока в обмотках, можно получить трансформаторы с значительно меньшими потерями мощности. Применение трансформаторов с улучшенными к. п. д. в сетях больших городов, безусловно, приведет к другим экономическим показателям и обусловит широкое внедрение напряжения 35 кв в сети больших городов Советского Союза.

Если по каким-либо соображениям будет найдено нецелесообразным изготовление всех выпускаемых заводами трансформаторов с повышенными к. п. д., то вопрос об изготовлении таких трансформаторов для городских и фабрично-за-

водских сетей должен быть решен отдельно. Внедрение напряжения 35 кв в городские и фабрично-заводские сети даст значительный экономический эффект. В районных сетях распределение энергии идет по воздушным линиям. В городских и фабрично-заводских сетях распределение энергии, как правило, должно вестись кабельными линиями. Стоимость воздушных линий 35 и 110 кв мало отличаются друг от друга, поэтому осуществление глубокого ввода с напряжением 110 кв в районных сетях экономически более оправдано, чем в городских и фабрично- заводских сетях, для которых соотношение стоимости кабельных линий крайне неблагоприятно для напряжения 110 кв.

Перед нашей электропромышленностью должен быть также поставлен вопрос об изготавлении кабелей 35 кв, гарантирующих высокую степень надежности эксплуатации, при одновременном снижении их стоимости. Минимальное сечение жил кабелей 35 кв должно быть снижено, по сравнению с кабелями, выпускаемыми в настоящее время.

Серьезным вопросом является построение схемы сети 35 кв. Возможны четыре основные схемы построения сети низкого напряжения:

1. Радиальная резервированная сеть. Каждая магистраль опирается на один источник питания.

2. Петлевая (кольцевая) сеть. Концы каждой петли опираются на один источник питания.

3. Магистральная сеть. Концы каждой магистрали опираются на разные источники питания.

4. Сложная замкнутая сеть, питаемая от нескольких источников питания.

Сложная замкнутая сеть 35 кв может быть оправдана только при очень развитой сети этого напряжения, если притом сеть 35 кв используется для обмена мощностями между источниками питания.

Третий тип магистральной сети, эксплуатируемой с замкнутыми магистралями, также может быть оправдан только в случаях, когда магистрали должны использоваться для обмена мощностями между источниками питания.

При необходимости использования сети 35 кв для обмена мощностями между источниками питания, предпочтительнее иметь магистральную, не сложную замкнутую сеть, поскольку сооружение и эксплуатация ее более сложны и дороги.

В ряде больших городов Советского Союза источники питания связаны между собой сетями 110  $\div$  220 кв, и обмен мощностями между ними происходит по сетям этих напряжений. В подобных случаях создание сети 35 кв, позволяющей обмен мощностями между источниками питания, нецелесообразно.

Выбор между сетями радиальной резервированной, петлевой и магистральной, эксплуатируемой с разомкнутыми магистралями может быть произведен только с учетом всех местных условий. Последние могут предопределить построение сети с применением в ней не одной, а двух или даже трех схем. Теоретические преимущества и недостатки этих трех типов сетей известны и потому здесь не указываются.

Самому тщательному обследованию должен быть подвергнут вопрос об экономически целесообразной мощности трансформаторных подстанций 35/(6  $\div$  10) кв. Этот вопрос применительно к электрическим сетям больших городов еще не подвергался серьезному изучению. Минимальная мощность трансформаторной подстанции теоретически может быть равна мощности, раздаваемой с распределительных пунктов. В частях города, где имеется развитая питательная сеть 6  $\div$  10 кв, замена распределительных пунктов трансформаторными подстанциями не может быть экономически оправдана. Кроме того, при такой замене встречаются очень большие затруднения при строительстве и временной эксплуатации реконструируемой сети. Повидимому, наиболее целесообразным решением явится питание от трансформаторных подстанций нескольких распределительных пунктов при мощности подстанции 10  $\div$  25 тыс. ква. Сеть 6  $\div$  10 кв, идущая от этих подстанций, наложится на существующую сеть того же напряжения и обеспечит нужную пропускную способность ее при резко возросших нагрузках. Такая структура сети позволит избежать прокладки дополнительных тяжелых питательных линий от удаленных источников питания 6  $\div$  10 кв.

Автор не считает необходимым наложение сети 35/6  $\div$  10 кв на существующую обязательным для всех районов города. В реконструируемой сети может оказаться экономически целесообразным оставить для отдельных районов города питание на напряжении 6  $\div$  10 кв.

В случае решения ввести при реконструкции городской сети напряжение 35 кв, вопрос об отказе от питательной сети 6  $\div$  10 кв для вновь развивающихся районов города должен быть подвергнут особенно тщательному изучению. При

трансформаторах с повышенными к. п. д. с учетом большого роста нагрузок в крупных городах возможно, что полная замена распределительных пунктов трансформаторными подстанциями 35/6  $\div$  10 кв окажется целесообразной. Должен быть просмотрен и вариант распределения энергии к сетевым трансформаторам при напряжении 35 кв. Последнее может оказаться выгодным только при снижении существующих цен на кабели и трансформаторы 35 кв и получении кабелей 35 кв с сечениями жил не более 50 мм<sup>2</sup>.

Замена распределительных пунктов подстанциями и строительство подстанций с трансформаторами, имеющими автоматическое регулирование напряжения даст хорошее и экономичное решение вопроса регулирования напряжения у потребителей. При разработке вопроса об экономической целесообразности введения напряжения 35 кв при реконструкции сети во всех вариантах выполнения сети должны быть обязательно учтены расходы, связанные с регулированием напряжения у потребителей. Неучет этих расходов может исказить технико-экономические показатели сравниваемых вариантов выполнения сети. Очевидно также, что проводить реконструкцию и развитие сетей больших городов Советского Союза без специальных мероприятий по регулированию напряжения у потребителей недопустимо.

Значительной реконструкции должны подвергнуться существующие питательные сети 6  $\div$  10 кв. Наиболее распространенная петлевая схема сети не может считаться обеспечивающей необходимую надежность электроснабжения крупных городов. Выпадение из работы одной магистрали (питательной линии) приводит к выводу из работы питательного пункта, что соответствует сбросу нагрузки 2  $\div$  5 тыс. квт. Реконструкция больших городов, как показывает опыт Советского Союза, ведет к увеличению этажности зданий, расширению круга применения электроэнергии в быту и т. п., что влечет за собой возрастание нагрузок на распределительные пункты, а следовательно, и к большим сбросам нагрузок при повреждениях в питательной сети высокого напряжения.

Единственным путем, полностью разрешающим вопрос о бесперебойности питания потребителей при повреждениях в питательной и распределительных сетях высокого напряжения и в трансформаторах, является сооружение замкнутых сетей низкого напряжения. Учитывая невозможность реконструкции всех участков сети низкого напряжения крупных городов на замкнутую сеть, необходимо широко внедрять автоматиза-

цию питательных сетей высокого напряжения. Введение автоматизации, повышающей надежность питания потребителей, не требует сложных аппаратов и устройств. Министерство электропромышленности может и обязано наладить серийный выпуск соответствующей аппаратуры. Серьезное внимание электропромышленность должна уделить повышению качества электроаппаратуры и выпуску новых упрощенных аппаратов, необходимых для рационального построения сетей больших городов.

Подчеркнем еще раз, что автоматизация питательных сетей высокого напряжения не решает вопроса о бесперебойности питания потребителей. Повреждения в трансформаторах и распределительной сети  $6 \div 10 \text{ кв}$  будут приводить к обесточиванию потребителей.

Повышенные требования к бесперебойности электроснабжения больших городов Советского Союза неминуемо резко ставят вопрос о переходе от разомкнутых сетей низкого напряжения к схемам замкнутых сетей. При замкнутых сетях низкого напряжения нарушения электроснабжения будут только при повреждениях в сети низкого напряжения, причем районы отключения будут очень невелики. Применяя замкнутую сеть с выжиганием кабеля в месте повреждения, можно в ряде случаев сохранить питание потребителей даже при повреждениях в сети низкого напряжения. Замкнутые сети низкого напряжения уменьшают потери мощности и энергии. Последнее относится, в особенности, к сетям, позволяющим при снижениях нагрузок централизованное отключение сетевых трансформаторов.

В Советском Союзе работы по внедрению замкнутых сетей низкого напряжения ведутся в очень ограниченном размере, что не может быть признано нормальным. Научные работы по замкнутым сетям низкого напряжения и сооружение опытных участков замкнутых сетей в городах Советского Союза должно явиться важнейшей задачей ближайших лет. Особо большое участие и внимание замкнутым сетям должны уделить энергообъединения, в ведении которых находятся сети крупных городов, подлежащих реконструкции.

Работы по замкнутым сетям низкого напряжения применительно к реконструкции электроснабжения больших городов следует вести в направлении изучения развитых замкнутых сетей, типа сетки.

Работы по внедрению замкнутых сетей низкого напряжения следует вести очень интенсивно и настойчиво, не смущаясь «детскими болезнями», неизбежными для нового типа сети. В этом отношении может быть отмечена только группа ленинградских научных работников и инженеров, возглавляемая Б. Л. Айзенбергом, которая в течение многих лет настойчиво занимается ограниченно замкнутыми сетями низкого напряжения; однако, ограниченно замкнутые сети в больших городах распространения найти не могут.

Не доведенный до конца опыт Мосэнерго по применению замкнутой сети низкого напряжения типа сетки для одного участка московской сети не дал положительного, а наоборот, оказал отрицательное влияние, и тем самым затормозил внедрение этого более совершенного типа сети в электрохозяйство городов Советского Союза.

Исключительно большое внимание должно быть уделено электроснабжению высоких зданий. Построение сетей в них на старых принципах вряд ли может считаться удовлетворительным. Подробному изучению следует подвергнуть вопрос о присоединении сетей высотных зданий к общегородской сети.

Большое народнохозяйственное значение имеет вопрос о напряжении сети и низкого напряжения. Принято считать, что полностью доказана целесообразность включения бытовых потребителей на напряжение 220 в и, как следствие этого, переоборудование сетей низкого напряжения и строительство сетей 380/220 в в новых районах города. С указанным положением, повидимому, можно согласиться, если имеется в виду город с относительно малыми плотностями нагрузок и в котором широко используются бытовые нагревательные приборы.

Электроснабжение больших городов Советского Союза, подлежащих реконструкции и развитию, находится в иных условиях. В первую очередь, такие города газифицируются и теплофицируются, что почти полностью снимает нагрузку от бытовых нагревательных приборов.

Если рассматривать электроснабжение большого города только с точки зрения капитальных затрат на сооружение сети, очевидно, что вариант сети 380/220 в будет всегда более выгодным, чем любой другой вариант выполнения сети. Если же учесть, что включение ламп накаливания на напряжение 220 в ведет к увеличению на 20% потребления мощности и энергии, то экономические преимущества сети большого города с включением бытовых потребителей на 220 в, по нашему мнению, не доказаны. Достаточно привести здесь одно соображение: при переводе питания ламп накаливания с суммарной нагрузкой 1 квт, с 127 на 220 в на электро-

станции потребуется установка дополнительной мощности 0,2 квт. Считая стоимость установленного киловатта на станции  $1\ 500 \div 2\ 000$  руб., получим дополнительные расходы на электростанции  $300 \div 400$  руб. К этому необходимо добавить расходы, связанные с увеличением мощности сетевых трансформаторов, увеличением сечений сети высокого напряжения, которые должны определяться по экономической плотности тока и т. п. Кроме того, на станциях для питания осветительной нагрузки придется сжигать топлива на 25% больше, чем при лампах накаливания 127 в. Включение ламп накаливания на 220 в равносилен построению сети с дополнительными потерями мощности и энергии в ней в размере 20%. Целесообразность построения такой сети представить трудно. Кроме того, при напряжении 127 в повышается безопасность пользования электроэнергией.

Все указанные перерасходы противопоставляются перерасходам, связанным с затратой цветного металла в сети только низкого напряжения. В реконструируемых больших городах относительная длина сети низкого напряжения меньше, чем в малых и средних городах. Нередки случаи, когда сетевые трансформаторы питают непосредственно внутридомовую сеть. Положение покойного проф. В. М. Хрущева о целесообразности включения бытовых потребителей в больших городах на 127 в никем еще не опровергнуто. Включение бытовых потребителей в новых районах на 220 в может развиваться при твердой уверенности, что в ближайшие 10 лет лампы накаливания будут полностью заменены газосветными.

Простейшим мероприятием по улучшению уровней напряжения в городских сетях является установка устройств, позволяющих вести независимое регулирование напряжения в городской и районной сетях. Необходима установка трансформаторов с регулированием напряжения под нагрузкой или дополнительных регулирующих трансформаторов на районных подстанциях и электростанциях, имеющих трансформаторные связи между городской и районными сетями. Сети больших городов часто имеют жесткую связь с районными сетями.

Проведение этого мероприятия не решает полностью вопрос о регулировании напряжения в городской сети. Однако, это мероприятие позволяет значительно сократить число потребных индивидуальных средств регулирования напряже-

ния в сети. Установка индивидуальных средств регулирования напряжения связана с значительными капитальными затратами и эксплуатационными затруднениями.

Недостаточная научная разработка проблемы регулирования напряжения в сетях больших городов позволяет только наметить пути возможного решения проблемы.

Как указывалось ранее, дробление мощности регулирующих напряжение устройств всегда будет связано с увеличением капитальных и эксплуатационных расходов. Необходимо найти разумный предел дробления мощности устройств для регулирования напряжения при соблюдении требований поддержания напряжения в определенных границах.

При внедрении в реконструируемые сети больших городов напряжения 35 кв, повидимому, достаточной явится установка на подстанциях  $35/6 \div 10$  кв трансформаторов с автоматической регулировкой напряжения под нагрузкой. При развитой питательной сети 6  $\div$  10 кв, приключенной непосредственно к шинам электростанций и районных подстанций, учитывая невозможность по конструктивным соображениям установки на них устройств для регулирования напряжения в отдельных питательных линиях, придется перенести регулирующие устройства в распределительные пункты сети высокого напряжения. Целесообразность этого мероприятия подтверждается и тем соображением, что при наличии независимого регулирования напряжения городской и районных сетей необходимость установки регулирующих устройств на значительном числе распределительных пунктов отпадает. Последнее соображение является, повидимому, правильным, если не ставить очень жестких требований к регулированию напряжения у потребителей и если от шин станций и районных подстанций питаются промышленные потребители, практически не требующие регулирования напряжения. При необходимости регулировать напряжение у промышленных потребителей различные очертания графиков нагрузок промышленных и бытовых потребителей потребуют установки значительно большего количества регулирующих напряжение устройств.

Объем статьи не позволяет остановиться на ряде других очень серьезных вопросов, связанных с реконструкцией и развитием электрических сетей крупных городов Советского Союза.

# О перспективах развития сельской электрификации Украинской ССР

П. И. БОГДАШКИН  
Заместитель министра сельского хозяйства УССР

Электрификация СССР, как и все народное хозяйство нашей страны, успешно развивается на основе государственного планирования, социалистической организации производства.

Государственное, социалистическое планирование в области электрификации страны практически осуществляется в СССР, начиная с первых лет Великой Октябрьской социалистической революции. Научно предопределил огромную роль электрификации в развитии нашей социалистической страны Владимир Ильич Ленин. Он ясно видел при этом, что успех электрификации зависит от ее общегосударственного планового развития. В своих заметках «О тезисах по аграрному вопросу французской коммунистической партии» Ленин писал, «...что современная передовая техника настоятельно требует электрификации всей страны — и ряда соседних стран — по одному плану; что такая работа вполне осуществима в настоящее время; что больше всего выиграло бы от нее сельское хозяйство и в особенности крестьянство;...». При этом Ленин отметил безусловную невозможность осуществить эту работу в пользу рабочих и крестьян без свержения власти буржуазии, без завоевания власти пролетариатом: «пока остается капитализм и частная собственность на средства производства, электрификация целой страны и ряда стран, во-первых, не может быть быстрой и планомерной; во-вторых, не может быть произведена в пользу рабочих и крестьян. При капитализме электрификация неминуемо приведет к усилению гнета крупных банков и над рабочими и над крестьянами» (Ленин, Соч., т. XXVII, стр. 106).

Под руководством В. И. Ленина был составлен исторический план ГОЭЛРО — план восстановления и развития хозяйства нашей страны на основе электрификации.

Товарищ Сталин в марте 1921 г. в своем письме к В. И. Ленину охарактеризовал этот план, как «Мастерский набросок действительно единого и действительно государственного хо-

На Украине довоенный уровень электрификации сельского хозяйства превзойден в текущем году в 3 раза. В этой республике, как и в других республиках и областях Советского Союза, проводится большая работа по составлению развернутой и научно обоснованной схемы развития сельской электрификации. В статье освещаются основные этапы и некоторые предварительные итоги этой работы в УССР.

зяйственного плана без кавычек» (Сталин, Соч., т. V, стр. 50), и признал необходимым немедленный приступ к делу — к практическому осуществлению намеченной программы работ.

Во исполнение решения VIII Всероссийского съезда советов о плане ГОЭЛРО Советским правительством в декабре 1921 г. был установлен конкретный план строительства электростанций общей мощностью 1 500 000 квт, рассчитанный на срок 10—15 лет. В этом постановлении правительства было обращено «особое внимание на широкую электрификацию сельского хозяйства и кустарной и мелкой промышленности», указывалось, что электрические станции местного значения могут строиться коммунами и кооперативными товариществами; всем областным экономическим совещаниям и состоящим при них плановым комиссиям было предложено приступить к разработке плана использования существующих электрических станций и плана сооружения электрических станций средней и малой мощности местного значения.

Чтобы расширить возможности строительства в деревне электростанций, 4 января 1923 г. ВЦИК и Совнарком разрешили создание крестьянских паевых товариществ по электроснабжению, в результате чего был разработан типовой «Устав кооперативного товарищества по электрификации сельского хозяйства». В 1924 г. в инструкции Совнаркома о налоге было предусмотрено специальное премирование за работы по применению в деревне электрической энергии, а при страховании электрифицированных селений постановлением Госстраха была установлена десятипроцентная скидка. Все эти государственные мероприятия служили делу всенародного развития сельской электрификации, делу общего подъема советской деревни.

В 1925 г., развивая ленинский кооперативный план и определяя задачи, вытекающие из необходимости кооперирования миллиона масс крестьянства, необходимости максимального снаб-

жения деревни тракторами, товарищ Сталин говорил: «Необходимо, наконец, проведение плана электрификации, как средство сближения деревни с городом и уничтожения противоположности между ними» (Сталин, Соч., т. VII, стр. 157). Тем самым товарищ Сталин выдвинул тогда крупнейшую политическую и народнохозяйственную задачу в области коренной переделки сельского хозяйства страны на базе колхозов, на основе широкой механизации и электрификации. Во все последующие годы — как до войны, так и теперь — указания товарища Сталина о плановом развитии электрификации претворяются в жизнь. Перед войной в СССР было электрифицировано 10 000 колхозов, свыше 23 000 машино-тракторных станций; в настоящее время насчитывается 25 000 электрифицированных колхозов и более 5 000 электрифицированных машино-тракторных станций.

Следует подчеркнуть огромную роль в успешном развитии сельской электрификации в послевоенный период двух постановлений Правительства СССР, подписанных товарищем Сталиным: 8 февраля 1945 г. «О развитии сельской электрификации», в котором для каждой республики и области был установлен конкретный план работ, и 29 мая 1948 г. «О плане развития сельской электрификации на 1948—1950 гг.», в котором, кроме плановых заданий, были даны все основные принципы, определяющие и направляющие дальнейшие пути развития в СССР сельской электрификации.

**Современное состояние сельской электрификации УССР.** В настоящее время сельская электрификация получает на Украине все возрастающее распространение. Первая крестьянская гидроэлектростанция появилась в республике в 1924 г. — это была Тывровская гэс, Винницкой области, построенная на средства крестьянского товарищества по строительству электростанции.

Значительных успехов достигла сельская электрификация при колхозном строю, в период до начала Великой Отечественной войны, когда на Украине было электрифицировано 1 311 колхозов, 251 совхоз, 690 машино-тракторных станций и 104 машино-тракторных мастерских.

Особенно широко развивается сельская электрификация в послевоенный период. В 1949 г. на Украине довоенный уровень превзойден в 3 раза. В республике электрифицировано около 4 000 колхозов, 300 совхозов, 1 000 МТС, 120 ремонтных заводов и межрайонных мастерских капитального ремонта. В сельскохозяйственном производстве работают в настоящее время свыше 10 000 электродвигателей, освещено более 500 000 изб колхозников и сельских учреждений.

Важнейшим шагом в деле осуществления широкой электрификации сельского хозяйства Украины является научная разработка общей перспективной схемы развития сельской электрификации.

На Украине первые практические шаги по составлению обоснованной и в своей основе научной схемы развития сельской электрифика-

ции были предприняты в 1945—1946 гг. в Запорожской области. По заданию облисполкома и обкома КП(б)У Запорожский филиал Всесоюзного научно-исследовательского института электрификации сельского хозяйства разработал «Областную схему развития сельской электрификации Запорожской области». В соответствии с этой схемой была разработана полная программа электрификации колхозов, совхозов, МТС и МТМ в Запорожской области, определены все возможные источники энергоснабжения и, прежде всего, роль такого мощного источника, как Днепрогэс имени Ленина. В схеме была разработана и определена также экономическая эффективность сельской электрификации.

В 1945—1947 гг. по заданию Киевского облисполкома и обкома КП(б)У республиканская контора «Укрсельэлектропроект» разработала «Генеральную схему энергоснабжения Киевской области».

В этой схеме, прежде всего, хорошо была изучена вся экономика области, а затем подсчитана потребность в электроэнергии.

Было принято во внимание, что во всех колхозах должны быть электрифицированы, в первую очередь: молотьба, кормоприготовление, водоснабжение, помол зерна и проведена электрификация колхозных мастерских. Учитывалось, что все дома сельского населения должны быть освещены и в известной мере электрические приборы получат применение в быту.

Была установлена необходимая мощность местных электростанций. Тщательно учтены гидроэнергетические, топливные и ветроэнергетические возможности области, на базе которых должны работать местные электростанции.

Подсчеты показали, что потребность сельского хозяйства Киевской области в электрической энергии обеспечивается местными энергетическими ресурсами полностью. При этом совершенно очевидно определилось, что, наряду с гидроресурсами, серьезным источником для получения электрической энергии могут быть тепловые электростанции, работающие на торфе.

Схема электрификации Киевской области разработала, таким образом, все основные вопросы использования местных энергетических ресурсов и указала наиболее рациональные пути получения дешевой электрической энергии.

В схеме были даны также расчеты, касающиеся общей стоимости всех намеченных работ и общей потребности в строительных материалах и оборудовании. Определена была очередность и последовательность выполнения намеченного плана работ.

В 1945—1947 гг. по указанию Совета Министров Украинской ССР и Центрального Комитета КП(б)У на Украине была проведена большая работа по составлению специального справочника по малым рекам УССР и по разработке типовых проектов местных электростанций.

Материалы по электрификации сельского хозяйства России, взятые из трудов Комиссии ГОЭЛРО, и опыт составления ряда областных схем использования местных энергетических ре-

сурсов были использованы для составления на Украине в 1947—1949 гг. общей схемы развития сельской электрификации Украинской ССР.

**Организация и принципы составления общей схемы развития сельской электрификации Украинской ССР.** Широкий размах работ по сельскому электростроительству в послевоенный период потребовал, чтобы сельская электрификация на Украине развивалась с достаточным учетом ее возможностей и перспектив, с надлежащим учетом имеющихся гидроэнергетических, топливных и ветроэнергетических ресурсов, с точным учетом современных потребностей социалистического сельского хозяйства в электрической энергии.

Совет Министров Украинской ССР и Центральный Комитет КП(б)У 1 ноября 1947 г. приняли решение о составлении схемы развития сельской электрификации Украинской ССР с тем, чтобы в дело развития сельской электрификации внести научный подход, целесоборазность, обоснованность, чтобы сельская электрификация развивалась в республике по единому плану. В этом решении были установлены: объем и основные принципы схемы, состав правительственной комиссии по руководству этой работой, состав научных учреждений и организаций, привлекаемых для выполнения отдельных разделов схемы, а также размеры финансирования. Выполнение основной работы по схеме было возложено на республиканскую проектную контору Укрсельэлектропроекта.

В директивах было указано, что схема развития сельской электрификации УССР должна предусматривать разрешение следующих основных вопросов:

а) рациональное использование для сельской электрификации всех мелких рек, местных видов топлива, ветроэнергоресурсов и электрической энергии крупных несельских электростанций;

б) установление глубины и очередности в охвате электрификацией сельскохозяйственного производства;

в) выявление потребности в капиталовложениях, оборудовании, материалах и кадрах для осуществления широкой электрификации сельского хозяйства Украинской ССР;

г) определение народнохозяйственной эффективности сельской электрификации в показателях экономии рабочей силы, живого тягла и в повышении продуктивности сельского хозяйства;

д) согласование плана развития сельской электрификации с планом широких мероприятий по орошению для создания страховых клинов сельскохозяйственных культур с устойчивыми урожаями.

Для определения потребности сельского хозяйства в электрической энергии и очередности охвата электрификацией сельскохозяйственных производственных работ было намечено составить:

а) укрупненные нормативы установленной мощности токоприемников и потребления ими электроэнергии;

б) примерные суточные, сезонные и годовые графики потребления электроэнергии для МТС,

МТМ, совхозов, колхозов и других сельскохозяйственных объектов в зависимости от мощности и характера их работы;

в) энергетический баланс, увязывающий различные энергоресурсы с потребностью сельского хозяйства в электроэнергии;

г) план электрификации сельского хозяйства по областям УССР в физических показателях и по годам осуществления.

К участию в работе было привлечено семь научно-исследовательских институтов и пять проектных организаций. Общее количество специалистов, принявших участие в выполнении этой важной государственной работы, составило более 180 человек. В числе их, в качестве консультантов и редакторов отдельных разделов, были привлечены: академик Г. М. Кржижановский, доктор техн. наук, проф. Т. Л. Золотарев, инж. М. М. Орахелашивили, доктор техн. наук, проф. Н. В. Терпугов, доктор техн. наук, проф. В. В. Веденников, член-корр. Академии наук УССР, проф. Г. И. Сухомел, доктор техн. наук, проф. А. В. Огиевский, доктор техн. наук, проф. И. Т. Швец, проф. А. В. Орловский, кандидат с.-х. наук Н. А. Сазонов и ряд других специалистов.

Схема развития сельской электрификации Украинской ССР, составленная в условиях полной победы в СССР колхозного строя, является новым ценным вкладом в дело государственного планирования в области сельской электрификации.

В схеме содержится целый ряд серьезных и новых разработок по таким важным вопросам, как экономические зоны республики, степени (уровни) электрификации колхозов, нормативы потребления в сельском хозяйстве электрической энергии, использование различных источников энергоснабжения, комплексное использование малых рек и, наконец, разработка вопроса о сплошной электрификации колхозов, совхозов, МТС и других сельских предприятий в границах крупной союзной республики.

Существующее экономическое различие сельскохозяйственных зон при подсчетах потребности сельского хозяйства в электрической энергии ранее, как правило, не учитывалось.

Изучение этого вопроса показало, что в пределах Украины имеется несколько характерных экономических зон и что каждая из них требует учета ее особенностей. Например, сельское хозяйство левобережной степной части УССР имеет в основном зерновое и животноводческое направление с частичным развитием на юге хлопка и клещевины. В правобережной лесостепной части УССР удельный вес зерновых культур уменьшается и за счет этого резко возрастает свеклосеяние. Имеют также свои особенности полесские области и горные районы прикарпатских областей.

Были выделены и отдельно учитывались зоны пригородных районов вокруг крупных городов и промышленных центров и зоны интенсивного развития специальных культур.

Рассмотрение каждой экономической зоны в отдельности позволило установить более точно перечень электрифицируемых производственных процессов, перечень электрифицируемых сельскохозяйственных машин и размеры потребления электрической энергии.

Разработка степени электрификации колхозов была осуществлена на Украине впервые. Подробное изучение этого вопроса показало, что для различных районов республики следует применить не одну — одинаковую для всех районов степень электрификации, а две — основную и широкую степени электрификации.

Основная степень электрификации — предусматривает достаточно полную электрификацию сельскохозяйственных производственных процессов, освещение и достаточно полное удовлетворение культурных и бытовых нужд колхозников.

В этом случае на один колхоз в среднем приходится не менее 15 электродвигателей. С их помощью электрифицируются все основные стационарные сельскохозяйственные машины, в частности, молотилки, зерноочистительные машины, насосы для орошения огородов и водоснабжения села, соломорезки, корнерезки, силосорезки, жмыходробилки, сепараторы молока, маслоизготовители, вакуумнасосы для дойки коров и ряд других применяемых в сельском хозяйстве машин.

Вместе с этим, электрифицируются мельницы, лесопилки, мастерские со всеми станками по металлу и дереву. Электрическая энергия используется также в различных нагревательных аппаратах, применяемых на животноводческих фермах.

Широкая степень электрификации — предусматривает применение в сельскохозяйственном производстве не менее двух единиц электродвигателей в среднем на колхоз, при помощи которых в полной мере электрифицируется не только все стационарные машины, но также и сельскохозяйственные машины по обработке почвы и уборке урожая, т. е. предусматривается применение электротракторов и электро-комбайнов. Широко применяются также электронагревательные установки для кормозапарников, для сушки сельскохозяйственных продуктов, для обогревания почвы в парниках и теплицах и т. д.

Широкая степень электрификации проектируется в зоне действия мощных гидроэлектростанций с активным балансом электроэнергии.

В качестве переходной степени электрификации при осуществлении схемы введена начальная степень электрификации, включающая освещение всех производственных и культурных помещений колхоза, жилых домов колхозников и улиц села, и применение пяти-шести мелких электродвигателей для электрификации наиболее грузоемких производственных процессов — молотьбы, зерноочистки, резки соломы и корнеплодов, первичной переработки молока, водоснабжения, привода станков в колхозной мастерской и кузнице.

Для определения потребности в электрической энергии были разработаны и применены единичные, укрупненные и комплексные нормативы потребления в сельском хозяйстве электрической энергии, которые учитывали перспективы развития сельского хозяйства и обеспечивали простоту подсчета электрических нагрузок по каждому административному району республики.

Разработка этих нормативов была выполнена Запорожским филиалом Всесоюзного научно-исследовательского института электрификации сельского хозяйства.

Единичные нормативы определяли потребность в электрической энергии по всем отдельным производственным процессам, по всем культурным и бытовым потребностям сельскохозяйственного населения в виде конкретных цифр на 1 т обработанной продукции, голову скота, 1 м<sup>2</sup> помещения и т. п.

Укрупненные нормативы, составленные на основе единичных нормативов, определяли потребность в электрической энергии отдельных типовых хозяйств, в число которых входили колхозы, совхозы, МТС, МТМ и другие сельскохозяйственные предприятия.

Комплексные нормативы, составленные на основе укрупненных нормативов, представляли собой обоснованные данные о необходимом количестве электрической энергии, приходящейся в среднем на 1 га обрабатываемой земли, на один колхозный двор и на одного колхозника, занятого в производстве.

Единичные нормативы, являющиеся одинаковыми для всех экономических зон республики, характеризуются следующими цифрами (табл. 1).

Таблица 1  
Коммунально-бытовое потребление электроэнергии в колхозах

Направление электрических на- грузок	Единица измерения	Степени электрификации					
		Установленная мощность, вт	Годовое элек- тропотребле- ние, вт·ч	Установленная мощность, вт	Годовое элек- тропотребле- ние, вт·ч	Установленная мощность, вт	Годовое элек- тропотребле- ние, вт·ч
Освещение жи- лых домов	1 м <sup>2</sup> полезной площади	2,4	2,4	3,2	4,8	3,2	4,8
Освещение об- щественно-куль- турных учрежде- ний	1 м <sup>2</sup> полезной площади	4,0	4,0	6,0	7,2	6,0	7,2
Наружное ос- вещение улиц	1 пог. м улицы	0,7	1,0	1,2	2,88	1,5	3,6
Освещение складских поме- щений	1 м <sup>2</sup> площа- ди	1,0	0,7	1,0	0,7	1,0	0,7
Общественно- бытовые пред- приятия:							
Бани и прачеч- ные	На 1 жи- теля	1,0	0,8	2,0	2,0	3,0	3,0
Хлебопекарни	На 1 жи- теля	1,0	1,0	2,0	2,0	2,0	2,0

Продолжение табл. 1

Наименование электрических нагрузок	Единица измерения	Степени электрификации					
		Начальная		Основная		Широкая	
		Установленная мощность, квт	Головое электропотребление, квтч	Установленная мощность, квт	Головое электропотребление, квтч	Установленная мощность, квт	Головое электропотребление, квтч
Индивидуальные бытовые нагревательные приборы	На 1 жителя	10,0	4,0	30,0	15,0	100,0	50,0
Радиофикация: индивидуальная	На 1 жителя	0,8	0,8	2,0	2,0	2,0	2,0
Радиоузлы	На 1 жителя	0,7	1,4	1,2	4,8	1,2	4,8
Кинофикация	На 1 жителя	2,2	0,88	2,2	1,3	2,2	1,3
Бытовое водоснабжение	На 1 жителя	2,0	1,6	3,0	4,8	3,0	4,8

Таблица 2

## Мощности и расход электроэнергии на одну голову скота

Виды скота	Степени электрификации					
	Начальная		Основная		Широкая	
	Установленная мощность, квт	Головое электропотребление, квтч	Установленная мощность, квт	Головое электропотребление, квтч	Установленная мощность, квт	Головое электропотребление, квтч
Корова . . . . .	74	39	206	245	390	515
Свиноматка . . . .	52	42	266	320	790	1 360
Лошадь . . . . .	34	22	76	54	95	114
Овца . . . . .	4,1	2,7	7,0	3,3	7,0	3,3

Таблица 3

## Мощности и расход электроэнергии в сельских подсобных предприятиях

Предприятие	Единица измерения	Степени электрификации			
		Основная		Широкая	
		квт	квтч	квт	квтч
Мельница с крупорушкой	На 1 т продукции	12*	25—35	12*	25—35
Маслобойка	На 1 т продукции	6,7*	320	6,7*	320
Сушка зерна	На 1 т продукции	6,0*	3,0	6,0*	3,0
Сушка сельскохозяйственных продуктов	На 1 т продукции	4,2*	3,0	44,5*	850
Сушка хлопка-сырца	На 1 т продукции	8,9*	17,8	8,9*	17,8
Лесопилка		25*	—	25*	—
Кирпично-черепичные заводы	На 1 тыс. штук кирпича	13,7*	12	13,7*	12
Мастерские	На 1 рабочего	1,0	1 000	1,4	1 100

Примечания: 1. Числа со звездочками показывают общую установленную мощность подсобного предприятия.

2. Принято, что мельница, маслобойка, кирпично-черепичный завод по своей производительности в состоянии обслуживать 3 колхоза, а лесопилка — 5 колхозов.

Укрупненные нормативы, как это указывалось выше, составлены для целого ряда средних типовых колхозов, имеющих различные степени электрификации и расположенных в различных экономических зонах УССР.

Приведем пример таких нормативов для среднего типового колхоза зерновой неорошающей зоны, имеющего 150 дворов и общую земельную площадь 1 250 га.

Таблица 4

Степень электрификации	Установленная мощность, квт	Годовое электропотребление, квтч
Начальная . . . . .	50	42 500
Основная . . . . .	150	150 000
Широкая . . . . .	300	320 000

На основе укрупненных нормативов были дальней определены для средних типовых колхозов комплексные нормативы на 1 га обрабатываемой земли.

Например, комплексные нормативы для одного среднего типового колхоза зерновой неорошающей зоны, имеющего 150 дворов и 1 250 га земли, характеризуются следующими данными.

Таблица 5

Расчетная единица комплексного норматива	Степени электрификации			
	Начальная		Основная	
	Установленная мощность, квт	Годовой расход электроэнергии, квтч	Установленная мощность, квт	Годовой расход электроэнергии, квтч
1 га пахотной земли . . . . .	0,04	33,8	0,12	120
1 колхозный двор . . . . .	0,34	264	0,98	1 000

Указанные нормативы позволили подсчитать годовое суммарное потребление электроэнергии и размер установленной мощности сельских потребителей.

Для определения мощности электрических источников, потребных для удовлетворения нужд сельского хозяйства, были разработаны графики нагрузки, учитывающие сезонность сельскохозяйственных работ, распорядок производственных процессов внутри колхоза, продолжительность и степень одновременности электрических нагрузок и т. п.

В результате произведенных подсчетов были получены нормативы максимальной потребной мощности на один типовой колхоз.

Например, для типового колхоза зерновой неорошающей зоны упоминавшаяся выше максимальная потребная мощность составила: для начальной степени электрификации — 25 квт, основной — 50 квт и широкой — 115 квт.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Кроме нормативов на 1 га, необходимых для определения потребности сельского хозяйства в электрической энергии, в схеме имеются также показатели энерговооруженности одного трудоспособного колхозника. Последние необходимы для характеристики производительности сельскохозяйственного труда.

Тщательно разработанные и научно обоснованные нормативы потребной мощности и электрической энергии явились базой для всей схемы электрификации сельского хозяйства и в этом отношении их значение нельзя недооценить.

Размеры настоящей статьи не дают возможности охарактеризовать, хотя бы и кратко, целый ряд других важных разработок, выполненных для схемы.

В схеме обобщается история и опыт всей прошлой работы в республике по сельской электрификации, подсчитываются и даются по каждой области гидроэнергетические, топливные и ветроэнергетические ресурсы, устанавливаются нормативы потребления в сельском хозяйстве электрической энергии, подсчитываются потребности сельского хозяйства в электрической энергии для всех областей и районов, устанавливаются степени электрификации колхозов с тем, чтобы точнее учитывать их потребности в электрической энергии и правильно соразмерить эти потребности с возможностями получения энергии от имеющихся на месте реальных источников питания.

Главное внимание в схеме сосредоточено на использовании для электрификации колхозов всех местных гидроэнергетических и топливных ресурсов, а также на широком использовании энергии ветра, которая, прежде всего, должна быть применена для механического привода различных рабочих машин, а также и для выработки электрической энергии. В некоторых областях, не имеющих местных энергетических ресурсов, но располагающих крупными государственными энергетическими системами, предусматривается частичное получение для сельского хозяйства электрической энергии от этих систем.

В схеме обращается особое внимание на строительство гидроэлектростанций укрупненной мощности (межколхозных), как более экономичных и надежных в работе, предусматривается создание местных энергосистем, объединяющих сельские гидроэлектростанции и тепловые электростанции.

Очень важно, что схема разрешает вопросы строительства сельских гидроэлектростанций не с позиций отдельных ведомств, а с точки зрения государственных интересов в целом, с пол-

ным учетом задач широкого развития в республике орошаемого хозяйства, гидромелиорации, речного транспорта, рыбного хозяйства и т. п., чем предусматривается целесообразное, комплексное развитие отдельных отраслей народного хозяйства республики.

Схема учитывает также, что электроэнергией в сельском хозяйстве должны обеспечиваться в первую очередь трудоемкие производственные процессы: работа мастерских, МТС, молотьба, очистка, сортировка, сушка и размол зерна, орошение, водоснабжение, кормоприготовление, дойка коров, стрижка овец, а также переработка продуктов сельского хозяйства.

\* \* \*

Приведенные здесь краткие данные о схеме с достаточной очевидностью устанавливают ее огромное значение для определения основных перспектив развития сельской электрификации Украинской ССР.

Разработанная схема явится основой для планирования развития сельской электрификации. Уже теперь ее материалы внесли единый метод и плановость в составление областных перспективных планов развития сельской электрификации. Материалы по гидроэнергетике (продольные профили рек, разбивка их на бьефы, перечень возможных гидроэлектростанций и их мощности) позволяют быстро находить нужные решения при проектировании гидроэлектростанций. Материалы о топливных ресурсах дают возможность определять места строительства наиболее рентабельных тепловых электростанций. Сведения по ветроэнергетике позволяют найти правильное решение вопроса о размещении в республике ветродвигателей. При помощи разработанных технико-экономических показателей стали возможны точные расчеты необходимых капиталовложений и материалов, экономической эффективности сельской электрификации и сроков окупаемости произведенных затрат.

Схема развития сельской электрификации Украинской ССР имеет большое государственное и политическое значение. Осуществление ее явится крупнейшим шагом в деле уничтожения противоположности между городом и деревней.

[16. 6. 1949]



# Теория открытой электрической дуги большой мощности

Кандидат техн. наук Р. И. КАРАЕВ

Московский энергетический институт им. Молотова

Электрическая дуга до настоящего времени еще недостаточно исследована. Имеющиеся сведения о ней большей частью представляют собой разрозненный эмпирический материал, причем наибольшее число работ было посвящено дуге в выключателе. В то же время исследования многих важнейших процессов в электрических цепях (в частности, некоторых аварийных режимов) невыполнимы из-за отсутствия инженерной теории дуги, которая могла бы дать формулы, аппроксимирующие с достаточной точностью ее поведение в любых условиях работы цепи.

Необходимо различать условия горения открытой электрической дуги, возникающей на воздушных линиях высокого напряжения, от условий, в которых горит дуга, возникающая в выключателе при отключении к. з. В выключателе процесс горения протекает в условиях принудительного перемешивания среды под воздействием потоков жидкости или газа. В результате интенсивного охлаждения и перемешивания наблюдаются явления погасания и повторного пробоя до и после перехода тока через нуль. В этих процессах наравне с термоионизацией доминирующую роль играет также явление ударной ионизации.

Условия горения открытой электрической дуги, возникающей на линии высокого напряжения переменного тока, значительно проще. Как показывают экспериментальные исследования [Л. 1], открытая дуга горит в относительно спокойных условиях, изменяя с течением времени, под действием конвекционных потоков воздуха, свою длину и форму. При переходе тока через нуль дуговой столб заметно не распадается, а температура его изменяется столь незначительно, что процесс горения дуги протекает без перерыва и пробоев, в основном, определяясь явлением термоионизации. Поведение электрической дуги в

В открытой электрической дуге большой мощности основными потерями из столба дуги являются конвекционные потери — унос тепла естественным потоком воздуха. В связи с этим в статическом режиме градиент мощной открытой электрической дуги не зависит от величины питающего ее токи. Для получения динамической характеристики составлено дифференциальное уравнение энергетического баланса дуги, с учетом изменения ее попечного сечения и проводимости. Интегрирование этого уравнения приводит к аналитической зависимости градиента дуги от тока и времени, которая дает возможность решить задачу об устойчиво горящей дуге в цепи переменного тока.

этих условиях и является предметом исследований настоящей работы.

**Статический режим дуги.** Вследствие того, что в ионизированном газе теплообмен между электронным и молекулярным газами происходит за счет микрополей весьма интенсивно, можно говорить об единой температуре положительного столба

дуги. Таким образом, положительный столб дуги представляет собой изотермическую плазму, температуру которой можно считать практически одинаковой во всем сечении. При этом как бы существует естественная граница, которая отделяет раскаленную ионизированную плазму от холдной окружающей среды большой плотности [Л. 3].

Основной причиной возникновения ионов в столбе дуги является термоионизация. Поэтому электрическая проводимость дуги, зависящая от плотности ионов в ее столбе, целиком определяется его температурой, которая, в свою очередь, может быть установлена из термодинамических расчетов, основанных на балансе энергии в электрической дуге.

Мощность, поступившая от источника в единицу длины столба дуги, равна  $Ei$ . Напряженность электрического поля  $E$ , ввиду большой длины дуги, можно подсчитать, пренебрегая околоэлектродными потерями напряжения, т. е. как частное от деления напряжения на длину дуги<sup>1</sup>. Ток в дуге равен

$$i = EF\gamma,$$

где  $F$  — площадь сечения столба дуги;

$\gamma$  — удельная проводимость, равная произведению концентрации электронов  $n_e$  на их подвижность  $K_e$ , т. е.  $\gamma = n_e K_e$ .

<sup>1</sup> Необходимо различать длину дуги и расстояние между электродами.

Концентрация электронов в плазме дуги в результате термоионизации [Л. 2]:

$$n_e = an \approx T^{1/4} e^{-\frac{b}{T}},$$

где  $a$  — степень ионизации газа;

$n$  — концентрация нейтральных частиц газа;  $b$  — постоянная, зависящая от свойств газа;  $T$  — температура газа в градусах абсолютной шкалы.

Учитывая, что множитель  $T^{1/4}$ , а также подвижность электронов

$$K_e \approx T^{1/2}$$

зависят от изменения температуры незначительно

по сравнению с величиной  $e^{-\frac{b}{T}}$ , считаем их неизменными и включаем в состав постоянной [Л. 2]<sup>2</sup>.

Тогда удельная проводимость дуги будет:

$$\gamma = n_e K_e = A_1 e^{-\frac{b}{T}}. \quad (1)$$

ток в дуге может быть подсчитан по формуле:

$$i = E F A_1 e^{-\frac{b}{T}}. \quad (2)$$

тепловые потери в дуге слагаются из: 1) потерь на излучение, 2) конвекционных потерь — lossa тепла естественными потоками воздуха (в случае вертикального столба — продольными потоками), а также потерь, вызванных закорачиванием петель и исключением их из столба дуги, и 3) потерь, вызванных теплопроводностью.

Первые два компонента пропорциональны объему столба дуги, а третий — площади боковой поверхности дугового столба.

Опытные исследования показывают, что в свободно горящей дуге при достаточно больших токах главным фактором является конвекция (око 80% общих потерь) [Л. 6]. Конвекционные потери (при учете явления диссоциации) пропорциональны:

$$vF(T^{1/2} - T_0^{1/2}),$$

где  $v$  — скорость воздуха;

$T_0$  — температура окружающего воздуха в °К.

Уравнение баланса энергии в столбе дуги в статическом режиме

$$Ei = A_2 F(T^{1/2} - T_0^{1/2}). \quad (3)$$

Уравнения (2) и (3) содержат четыре переменных:  $E$ ,  $i$ ,  $F$ ,  $T$ . Для того, чтобы найти интересующую нас зависимость

$$E = \varphi(i),$$

адо составить еще одно уравнение. Его можно оставить на основании «теории минимума» [Л. 3]. Это уравнение должно дать величину поперечного сечения столба дуги. Иначе одному и тому же току не будет соответствовать опреде-

ленное состояние дугового столба, и при малом поперечном сечении будет иметь место более высокая температура, большая проводимость и большая плотность тока, а при большом поперечном сечении — меньшая плотность тока и более низкая температура и проводимость. Между этими крайними случаями будет иметь место одно состояние дугового столба, которое соответствует наименьшей напряженности. Это состояние и отвечает статическому режиму, так как при этом имеет место наименьшая затрата энергии (аналогично в механике — состояние системы, соответствующее наименьшей потенциальной энергии).

Искомое отношение:

$$\frac{\partial E}{\partial F} = 0. \quad (4)$$

Определяя  $F$  из (3) и подставляя в (2), получаем:

$$i = EFf\left(\frac{Ei}{F}\right).$$

Дифференцируя по  $F$  при учете равенства (4), имеем:

$$Ef\left(\frac{Ei}{F}\right) - \frac{E^2 i}{F} f'\left(\frac{Ei}{F}\right) = 0.$$

Интегрируя, получаем

$$f\left(\frac{Ei}{F}\right) = \text{const} \left(\frac{Ei}{F}\right),$$

или

$$\frac{Ei}{F} = \text{const}_1. \quad (5)$$

Сопоставляя (5) с (3), убеждаемся, что в статическом режиме

$$T = \text{const}_2. \quad (6)$$

Сопоставляя (5) и (6) с (2), приходим к выводу, что статическая характеристика открытой электрической дуги большой мощности<sup>3</sup> может быть записана:

$$E_{cm} = \text{const}_3.$$

и что площадь поперечного сечения дуги пропорциональна току, т. е.

$$j_{cm} = \frac{i}{F} = \text{const}_4.$$

Полученные результаты согласуются с опытными данными [Л. 8]. По данным Ю. В. Буткевича [Л. 5] при питании дуги постоянным током при малых  $i$  температура столба дуги несколько растет с увеличением тока. Но уже при  $i = 50$  а она стабилизируется на значении  $T \approx 6300$  °К. Этой температуре отвечает определенная удельная проводимость, а значит и плотность тока, и напряженность электрического поля в столбе дуги.

<sup>3</sup> Элагель и Штенбек получили статическую характеристику дуги  $E^3 i = \text{const}$  [Л. 3, т. II, стр. 161], так как они исходили из предположения, что основными являются потери с поверхности столба дуги. Этот расчет соответствует маломощной дуге, имеющей малое поперечное сечение и относительно большую боковую поверхность.

<sup>2</sup> Для воздуха  $\gamma = A_1 e^{-\frac{b}{T}} \approx T^{12} \div T^{15}$ .

Измерения градиента в открытой дуге [Л. 6.] дают значение градиента  $E_{cm} = 10 \text{ в/см}$  при  $i = 50 \text{ а}; E_{cm}$  медленно увеличивается с увеличением тока.

**Динамическая характеристика электрической дуги.** Как показано выше, если уменьшить ток в дуге, то должно уменьшиться и поперечное сечение столба дуги. Однако, этот процесс перестройки дугового столба совершается с определенной скоростью и при изменении тока скачком мы будем наблюдать склонение температуры дугового столба от значения, соответствующего статическому режиму, с последующим его восстановлением.

Баланс мощности в положительном столбе дуги в нестационарном режиме будет поэтому содержать член, учитывающий изменение энергии, накопленной в дуговом столбе, в связи с изменением его сечения и температуры. Предполагая для упрощения, что дуговой столб изменяет свою температуру одинаково во всем поперечном сечении, запишем баланс мощности в виде:

$$Ei = A_2 F(T^{1/2} - T_0^{1/2}) + A_3 \frac{d}{dt}(cFT), \quad (7)$$

где  $c$  — теплоемкость газа с учетом изменения его плотности, а также с учетом процесса диссоциации;  $c \approx T^{-1/2}$  [Л. 6]. Учитывая равенство (1), имеем:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{d\gamma}{dt} \cdot \frac{T^2}{b\gamma}.$$

Так как величина  $\gamma$  весьма быстро изменяется с изменением  $T$ , получаем дифференциальное уравнение:

$$\frac{d\gamma}{dt} + \gamma \left( 2m \frac{dF}{dt} + B \right) - B_1 \frac{i^2}{F^2} = 0, \quad (8)$$

где  $m$ ,  $B$  и  $B_1$  — новые постоянные.

$$E = \frac{i}{F\gamma} = \frac{\sqrt{2} ma E_{cm} \sin \omega t}{B [1 - \cos \beta \cos (2\omega t - \beta)]^{1/2}}$$

Применяя уравнение (8) к случаю питания дуги неизменным током (статический режим), получаем

$$B_1 = \frac{B}{j_{cm} E_{cm}};$$

тогда уравнение (8), которое мы назовем основным дифференциальным уравнением электрической дуги, будет иметь вид:

$$\frac{d\gamma}{dt} + \gamma \left( 2m \frac{dF}{dt} + B \right) - \frac{B \cdot i^2}{j_{cm} E_{cm} F^2} = 0. \quad (9)$$

Для того, чтобы проинтегрировать уравнение (9), надо знать, как изменяется площадь поперечного сечения столба дуги. При всяком отклонении от стационарного режима, т. е. при изменении плотности тока по сравнению с величиной, отвечающей этому режиму, эта площадь будет изменяться таким образом, чтобы принять значение, отвечающее новому значению тока в дуге. Поэтому относительное изменение площади поперечного сечения дуги во времени

$$\frac{dF}{dt} : F$$

должно зависеть от того, насколько квадрат плотности тока в дуге отклонился от величины соответствующей статическому режиму, т. е. от разности:

$$\left( \frac{i}{F} \right)^2 - j_{cm}^2.$$

Наиболее простое соотношение мы получим если примем пропорциональность между этим величинами.

Таким образом, получается уравнение

$$\frac{dF}{dt} : F = D \left( \frac{i^2}{F^2} - j_{cm}^2 \right), \quad (10)$$

которое мы назовем вспомогательным дифференциальным уравнением электрической дуги.

Совместное решение дифференциальных уравнений (9) и (10) дает нам закономерности изменения величины поперечного сечения дуги  $F(t)$  удельной проводимости  $\gamma(t)$ , а значит и градиента  $E(t)$ , если задан закон изменения тока в дуге  $i(t)$ .

Градиент в устойчиво горящей дуге, т. е. падение напряжения на единице длины дуги при питании синусоидальным током<sup>5</sup>  $i = I_{max} \sin \omega t$

$$E = \frac{\sqrt{2} ma E_{cm} \sin \omega t}{B_1 \left[ 1 - (B - ma) \frac{e^{-\frac{B\pi}{\omega}} \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} e^{Bt} z^m dt + \int_0^t e^{Bt} z^m dt}{e^{Bt} z^m} \right]}, \quad (11)$$

где

$$z = F^2 = \frac{i^2_{max}}{2j_{cm}^2} [1 - \cos \beta \cos (2\omega t - \beta)], \quad (12)$$

причем

$$\beta = \arctg \frac{2\omega}{a} \text{ и } a = 2D j_{cm}^2.$$

<sup>4</sup> Плотность тока возведена в квадрат, так как процессы в электрической дуге не зависят от направления тока. Результаты исследования получаются аналогичные, если относительное изменение площади поперечного сечения дуги поставить в зависимость от абсолютной величины тока.

<sup>5</sup> В приложении 1 рассмотрен общий случай.

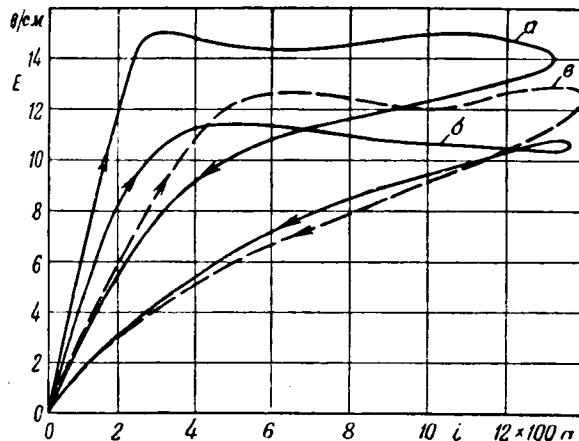


Рис. 1. Вольтамперные характеристики электрической дуги 60 гц.

( $\alpha$ -кривая [Л. 7] для второго полупериода;  $\beta$ —кривая [Л. 7] для шестидесяти гц;  $\gamma$ —расчетная кривая для установившегося режима (значения постоянных:  $E_{cm} = 10$  в/см,  $m = 12$ ,  $a = 200$  сек $^{-1}$ ,  $B = 3000$  сек $^{-1}$ ).

Входящий в состав формулы (11) интеграл весьма трудно найти аналитически и поэтому решается нами численным методом (с помощью формулы Симпсона). Определение значений постоянных, входящих в состав формулы (11), дано в приложении 2.

**Результаты расчетов градиента в дуге при питании синусоидальным током.** Из формулы (11) ясно, что величина градиента в дуге не зависит от амплитуды тока  $I_{max}$ , что соответствует результатам экспериментов с открытыми дугами в линиях высокого напряжения переменного тока [Л. 7] и [Л. 1]. По опытным данным максимальный градиент дуги, питаемый синусоидальным током, для токов до 5 000 а.

$$E_{max} = 12,6 \pm 0,4 \text{ в/см}$$

медленно возрастает до 15 в/см для токов, превышающих эту величину, но не больших 20 000 а.

Расчетная кривая градиента хорошо соглашается с осциллограммами, полученными опытным путем. Для сопоставления, на рис. 1 приведены вольтамперные характеристики, полученные расчетным путем и построенные на основе осциллограмм для 60 гц [Л. 7].

При частоте питающего тока 50 гц (рис. 2) расчетная кривая градиента характеризуется следующими особенностями. После перехода тока через нуль, вследствие охлаждения дуги, а значит и уменьшения ее проводимости, градиент резко возрастает, значительно опережая на этом резке времени синусоиду. Далее, в течение значительной части полупериода, градиент сохраняет почти постоянное значение и быстро убывает с уменьшением тока.

Для 25 гц расчеты дают резкий пик градиента для момента времени непосредственно после перехода тока через нуль, обусловленный изменением величины проводимости дугового магнита. При частоте 200 гц кривая градиента показывает мало отличающейся от синусоиды. При  $\omega t = \pi$  дуга представляет собой линейный элемент, и градиент синусоидален.

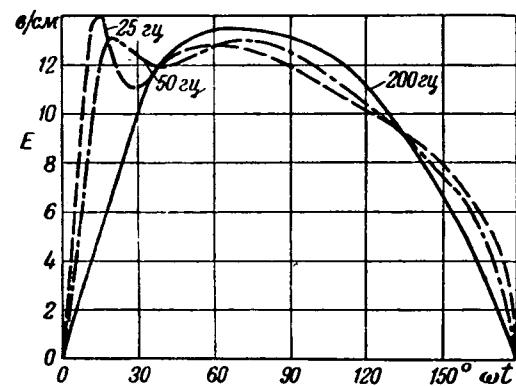


Рис. 2. Градиенты электрической дуги при синусоидальном токе.

(значения постоянных:  $E_{cm} = 10$  в/см,  $m = 12$ ,  $a = 200$  сек $^{-1}$ ,  $B = 3000$  сек $^{-1}$ ).

При составлении настоящей работы автор получил от проф. Л. И. Сиротинского ценные советы и указания.

**Приложение 1. Интегрирование дифференциальных уравнений электрической дуги.** Ток в электрической дуге может быть записан в виде ряда

$$i = \sum_{k=1}^{\infty} I_{k \text{ макс}} \sin(k\omega t + \phi_k).$$

Произведя замену переменного

$$z = F^2,$$

интеграл вспомогательного дифференциального уравнения (10) можно записать в виде:

$$\begin{aligned} z &= e^{-at} \left\{ c + \frac{a}{j_{cm}} \int e^{at} \left[ \sum_k I_{k \text{ макс}} \sin(k\omega t + \phi_k) \right]^2 dt \right\} = \\ &= e^{-at} \left\{ c + \frac{a}{j_{cm}} \int e^{at} \left[ \sum_r I_{r \text{ макс}} \sin(r\omega t + \phi_r) \right] \times \right. \\ &\quad \times \left. \left[ \sum_s I_{s \text{ макс}} \sin(s\omega t + \phi_s) \right] dt \right\} = \\ &= ce^{-at} + \frac{1}{2j_{cm}} \left\{ \sum_r \sum_s I_{r \text{ макс}} I_{s \text{ макс}} \left[ \cos \beta_{(r-s)} \times \right. \right. \\ &\quad \times \cos \left( (r-s)\omega t + \phi_r - \phi_s - \beta_{(r-s)} \right) - \cos \beta_{(r+s)} \times \\ &\quad \times \cos \left( (r+s)\omega t + \phi_r + \phi_s - \beta_{(r+s)} \right) \left. \right] \}, \end{aligned} \quad (13)$$

где

$$\beta_{(r \pm s)} = \arg \operatorname{tg} \frac{(r \pm s)\omega t}{a}; \quad a = 2Dj_{cm}^2. \quad (14)$$

Основное дифференциальное уравнение (9) может быть переписано в виде

$$\frac{dz}{dt} + \gamma \left[ m \frac{dz}{dt} + B \right] - \frac{B j_{cm}}{E_{cm}} \left[ \frac{dz}{dt} + 1 \right] = 0.$$

Его решение

$$\gamma = \frac{c_1}{e^{Bt} z^m} + \frac{Bj_{cm}}{maE_{cm}} \left[ 1 - (B - ma) \frac{\int e^{Bt} z^m dt}{e^{Bt} z^m} \right]. \quad (15)$$

Исследуем подробнее установившийся режим. Величина.

$$\begin{aligned} & \int_0^{\frac{2\pi n}{\omega} + t} e^{Bt} z^m dt = \int_0^{\frac{2\pi n}{\omega}} e^{Bt} z^m dt + \int_{\frac{2\pi n}{\omega}}^{\frac{2\pi n}{\omega} + t} e^{Bt} z^m dt \\ \eta = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\int_0^{\frac{2\pi n}{\omega} + t} e^{Bt} z^m dt}{e^{B(\frac{2\pi n}{\omega} + t)} \cdot z^m} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{B2\pi}{\omega}}{e^{B\frac{2\pi}{\omega}} \left[ e^{Bt} z^m \right]} = \\ &= \frac{1 - e^{-\frac{B2\pi n}{\omega} \frac{\pi}{\omega}}}{1 - e^{-\frac{B\pi}{\omega}}} \cdot \frac{\frac{B2\pi n}{\omega}}{\int_0^t e^{Bt} z^m dt} \approx \\ &= \frac{1 - e^{-\frac{B\pi}{\omega}}}{1 - e^{-\frac{B\pi}{\omega}}} \cdot \frac{\frac{B2\pi n}{\omega}}{\int_0^t e^{Bt} z^m dt} \approx \\ &\approx \frac{e^{-\frac{B\pi}{\omega}}}{e^{-\frac{B\pi}{\omega}}} \cdot \frac{\frac{B2\pi n}{\omega}}{\int_0^t e^{Bt} z^m dt}, \end{aligned}$$

так как  $e^{-\frac{B\pi}{\omega}} \gg 1$ .

Таким образом, удельная проводимость столба дуги в установившемся режиме (устойчиво горящая дуга) определяется формулой:

$$\gamma = \frac{Bj_{cm}}{maE_{cm}} \left[ 1 - (B - ma) \frac{\frac{B\pi}{\omega}}{e^{-\frac{B\pi}{\omega}} \int_0^t e^{Bt} z^m dt} \right]. \quad (16)$$

**Приложение 2. Определение постоянных, входящих в состав формулы (11).**

Постоянная  $m$  равна:

$$m = \frac{b}{m} = \frac{1}{2} \cdot \frac{ev_i}{RT}, \quad (17)$$

где  $ev_i$  — работа ионизации, которая для воздуха (кислорода) равна 13.5 эз (при ионизации без промежуточных ступеней);

$R$  — константа Больцмана  $= 1,37 \cdot 10^{-16}$  эрг на  $^{\circ}\text{К}$ ;  
 $T$  — абсолютная температура газа (в среднем за полупериод может быть принята равной  $6300^{\circ}\text{К}$ ).  
Подставляя в (17) эти значения, получаем:

$$m \approx 12.$$

Постоянная  $B$  характеризует потери тепловой энергии из столба дуги. На величину этой постоянной оказывает влияние скорость ветра (если он имеет место), расположение электродов и изменение расстояния между ними в процессе горения дуги. Она выбрана нами равной  $B = 3000$  сек. $^{-1}$  с таким расчетом, чтобы получить наибольшее приближение к величине градиента, измеренного на дугах большой мощности при отсутствии ветра и при неизменном расстоянии между электродами [Л. 7].

Постоянная  $a$  может быть вычислена по данным измерения колебания поперечного сечения столба дуги, питаемого синусоидальным током (установившийся режим). Действительно, согласно (12):

$$\frac{F_{\min}^2}{F_{\max}^2} = \frac{1 - \cos \beta}{1 + \cos \beta},$$

откуда

$$a = \omega \frac{1 - \left( \frac{F_{\min}}{F_{\max}} \right)^2}{\frac{F_{\min}}{F_{\max}}}. \quad (18)$$

Однако, исходные измерения выполнены [Л. 4] для относительно малых токов и при весьма небольшом расстоянии между электродами и потому, применительно к нашему случаю, результаты не могут считаться вполне достоверными.

## Литература

1. В. В. Бургсдорф. Открытые электрические дуги большой мощности. Электричество, № 10, 1948.
2. Н. А. Капцов. Электрические явления в газах и вакууме, Гостехиздат, 1947.
3. А. Энгель и М. Штебек. Физика и техника электрического разряда в газах, ОНТИ, 1936.
4. Ю. В. Буткевич. Исследование температуры газа дуги. Бюллетень ВЭИ, № 1, 1935.
5. Ю. В. Буткевич. Ионно-механическое выключение цепей переменного тока высокого напряжения. Докторская диссертация, 1937.
6. Holm, Kirschtein, Koppelman. Wiss. Veröff. d. Siemens Konzern, т. 13, 1934.
7. A. P. Strom. Исследование длинных дуг переменного тока 60 гц. El. Eng., № 3, 1946.
8. К. К. Хренов. Электрическая сварочная дуга. Машгиз, 1949.



# Индуктированные напряжения на линиях электропередачи

Кандидат техн. наук, доц. А. И. ДОЛГИНОВ

Всесоюзный заочный энергетический институт

Важнейшим элементом расчета грозовой защиты линий электропередачи является определение напряжений, индуцируемых на проводах тока молнии, протекающими в тросах, главном канале, соседних проводах.

Электромагнитное поле на линии при грозовом разряде не может рассматриваться как плоское, в связи с чем в расчетах не могут применяться волновые соотношения для плоских полей. В задачу настоящей статьи входит изучение общих закономерностей распространения волн в многопроводных системах и определение индуцированных напряжений в важнейших частных случаях. В соответствии с задачами исследования рассматриваются электромагнитные процессы на фронте волны.

**Индуктированные напряжения в многопроводной системе.** Фронт волнового процесса на линии с потерями можно в самом общем виде представить уравнением  $U = F(t - \frac{s}{v})$ . Это уравнение означает, что фаза напряжения  $U = \text{const}$  движется вдоль линии со скоростью  $v$ , т. е. пробегает путь  $s$  за время  $\frac{s}{v}$ . Скорость  $v$  может быть зависимой как от напряжения, так и, например, от пройденного пути  $s$ . На линии с потерями на корону скорость  $v$  является функцией лишь напряжения  $U$  [Л. 1] и, следовательно, точки фронта волны с неизменной ординатой  $U = \text{const}$  движутся с постоянной скоростью  $v(u)$  (рис. 1). На каждом бесконечно-малом участке провода с напряжением  $U$  связан заряд  $Q_k = \sigma_k dx$  ( $\sigma_k$  — линейная плотность заряда). Следует, однако, заметить, что такая связь однозначна лишь для волн с достаточно малой скоростью изменения напряжения, когда заряд на бесконечно малом участке определяется лишь напряжением этого участка:  $\sigma_k dx = UC_0 dx$ , где  $C_0$  — емкость на единицу длины линии. Как извест-

но, это допущение кладется в основу уравнений длинных линий и, следовательно, может быть принято и в рассматриваемом случае распространения волн грозового происхождения.

В силу однозначной связи  $Q_k(u)$  волновой процесс  $U = F(t - \frac{s}{v})$  можно представить как перемещение со скоростью  $v(u)$  зарядов  $Q_k$ . Аналитически это можно записать в виде  $Q_k = F_1(t - \frac{s}{v})$ . Ясно, что такое представление отнюдь не означает перемещения действительных физических зарядов. Так, например, заряды, связанные коронным чехлом, остаются неподвижными в течение всего времени существования коронного чехла. Для уяснения физического смысла вводимого представления поместим точку фронта волны  $U = \text{const}$  в движущуюся со скоростью  $v(u)$  систему координат  $S^*$  (рис. 1). Тогда, хотя через координату  $x^*$  проходят и различные в смысле нумерации заряды  $Q_k$ , величина этих зарядов, а следовательно, и электрическое поле, связанное с ними, остаются неизменными. Ничто в протекании волнового процесса не изменится, если мы будем считать заряд  $Q_k$

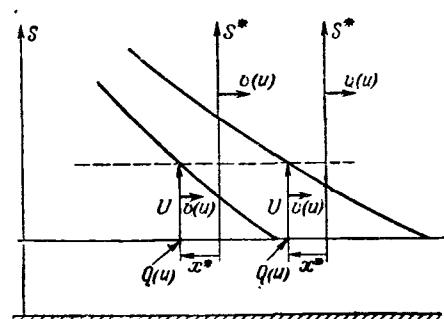


Рис. 1.

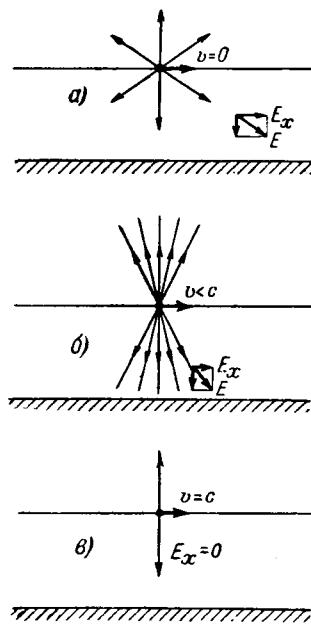


Рис. 2. Электрическое поле точечного заряда.

электрическое поле движущихся зарядов сплющивается в направлении движения: сокращается продольная составляющая напряженности электрического (кулоновского) поля  $E_x$  (рис. 2, а и б). Сокращение  $E_x$  заменяет понятие противо-э. д. с. классической электродинамики.

В предельном случае движения заряда со скоростью  $v=c$  поле оказывается стянутым в плоскость, перпендикулярную направлению движения (рис. 2, в). Такое поле и называется плоским.

На линии без потерь скорость волны, или, согласно принятому представлению, скорость перемещения системы зарядов равна скорости света  $c$ . Следовательно, поле волны на линии без потерь является плоским. На линиях с потерями, в частности, на линии с потерями на корону, скорость перемещения зарядов  $Q_k$  меньше скорости света ( $v < c$ ). Наличие потерь приводит к искажению плоского поля и к появлению продольных составляющих  $E_x$ , тем больших, чем меньше  $v$ .

Перейдем теперь к рассмотрению напряжений, индуцируемых на линиях в многопроводной системе. Примем простейший и в то же время наиболее интересный с практической точки зрения случай изолированной "линии связи", показанной на рис. 3 (линией связи будем называть линию, на которой индукция является единственным источником напряжения).

В целях симметрии положим распространение волн в обе стороны от источника напряжения. Именно такая схема лежит в основе расчетов грозоупорности линий передачи. Для плоской волны ( $v=c$ ), т. е. волны на линии без потерь, электрическое поле целиком лежит в плоскости, перпендикулярной к оси линии (рис. 3, а). Ясно, что вектор  $E$ , пересекающий провод под прямым углом, может вызвать лишь разделение зарядов

и физически неизменным. Это обстоятельство было использовано [Л. 1] в выводе, чисто формальным путем, соотношения для тока волны  $i_k = \sigma_k v$ .

В системе  $S^*$  поля заряда  $Q_k$ , как поле неподвижного точечного заряда, является чисто кулоновским. Преобразование этого поля к неподвижной системе координат, связанной с землей, производится в соответствии с выводами специальной теории относительности.

Рассмотрим движение заряда  $Q_k$  при скоростях  $v < c$  ( $c$  — скорость света). Согласно релятивистской электродинамики, электри-

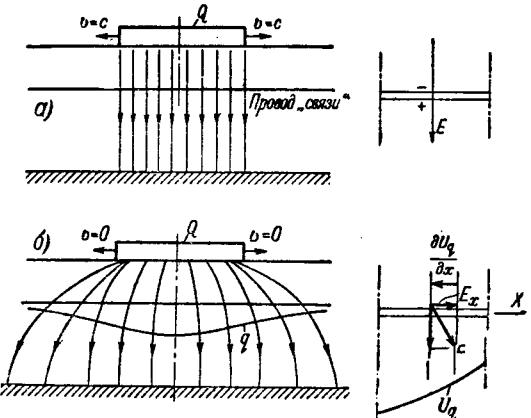


Рис. 3.

в сечении провода; сумма же зарядов в каждом сечении толщиной  $dx$  остается неизменно и равной нулю. Таким образом, плоская волна не индуцирует заряды на линии. Провод связи расположенный на эллиптической поверхности электрического поля, "пассивно" приобретает потенциал этой поверхности. Заметим, однако, что этот вывод справедлив лишь при изолированном проводе связи.

Рассмотрим другой крайний случай неподвижной системы зарядов, когда  $v=0$  (рис. 3, б). Электрическое поле здесь статическое. Потенциал провода в бесконечности равен нулю; в электростатическом поле потенциал провода выравнен и, следовательно, равен нулю по всей длине. Провод приобретает нулевой потенциал за счет зарядов  $q$ , подтянутых с дальних участков линии. Знак  $q$  обратен знаку индукирующей системы. Неподвижная система зарядов связана с электрическим полем, содержащим продольные составляющие вектора напряженности поля. На каждом участке провода связи  $E_x$  уравновешивается падением потенциала  $\frac{\partial U_q}{\partial x}$ , где  $U_q$  — потенциал провода, создаваемый индуцированными зарядами  $q$ . Следовательно, потенциал любой точки  $x$  равен

$$U_q = \int_{-\infty}^x E_x dx.$$

Промежуточное положение занимает случай (рис. 4) распространения волны со скоростью  $v < c$  (начало фронта волны, однако, распространяется всегда со скоростью  $c$ ). Наличие составляющей поля  $E_x$  вызывает подтекание зарядов на линии "связи". Следовательно, не может быть и речи о "пассивной" роли этой линии, как в случае плоской волны. Чем ближе  $v$  к скорости света, тем меньше составляющая  $E_x$  (сплюсывание поля) и меньше наведенный заряд.

Подтекание зарядов на линии связи создает ток  $i_q$ . В каждый данный момент на участке  $dx$  провода напряженность поля  $E_x$  уравновешивается перепадом потенциала  $\frac{\partial U_q}{\partial x}$ , создаваемым

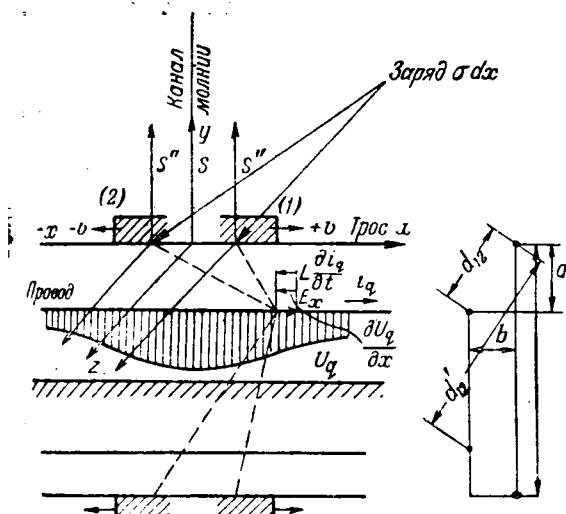


Рис. 4. Расчетная схема индуктируемого напряжения на изолированном проводе ( $v < c$ ).

индуктированными на проводе зарядами и электродвижущей силой  $E_q = L \frac{\partial i_q}{\partial t}$ , связанной с протеканием тока  $i_q$

$$E_x = \frac{\partial U_q}{\partial x} + L \frac{\partial i_q}{\partial t}. \quad (1)$$

Изменение тока на длине  $dx$  равно приращению заряда, т. е.  $\frac{\partial i_q}{\partial x} = C_0 \frac{\partial U_q}{\partial t}$ , откуда  $i_q = C_0 \int \frac{\partial U_q}{\partial t} dx + \text{const.}$

Следовательно

$$E_x = \frac{\partial U_q}{\partial x} + L C_0 \frac{\partial}{\partial t} \int_x^{ct} \frac{\partial U_q}{\partial t} dx.$$

Так как напряжение  $U_q$  в точке  $x = ct$  равно нулю при всех значениях  $x$ , то возможно дифференцирование под знаком интеграла. Получаем, обращая пределы интегрирования,

$$E_x = \frac{\partial U_q}{\partial x} - \frac{1}{c^2} \int_{ct}^x \frac{\partial^2 U_q}{\partial t^2} dx.$$

Дифференцируем обе части по  $x$ :

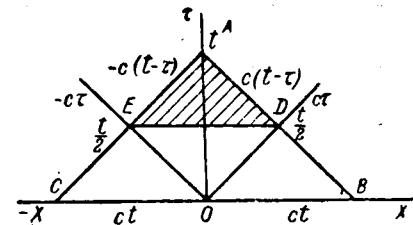
$$\frac{\partial^2 U_q}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 U_q}{\partial t^2} = \frac{\partial E_x}{\partial x} = -\frac{\partial^2 U_q}{\partial x^2}. \quad (2)$$

Полученное неоднородное волновое уравнение имеет нулевые начальные условия, так как в момент времени  $t = 0$  линия связи свободна от зарядов  $q$  и, следовательно,  $U_q$  и  $\frac{\partial U_q}{\partial t}$  равны нулю.

Для решения уравнения (2) относительно  $U_q$  следует определить  $E_x$  поля волны, представляемой движущейся системой зарядов  $Q_k$ .

Разобьем волну  $U(t)$  на элементарные прямоугольные волны  $\Delta U = \text{const}$ , движущиеся с неизменной скоростью  $v(u)$ , и проведем расчет для одной из таких волн (рис. 4). Этот прием,

Рис. 5. Область интегрирования треугольник DAE



не снижающий строгости окончательного вывода, в то же время значительно упрощает расчеты, поскольку можно принять  $dx = d(v\tau) = vdt$ . Прямоугольной волне соответствует система зарядов неизменной плотности  $\sigma_k$ .

Составляющая поля  $dE_x$  от заряда  $Q_k = \sigma_k dx$  в соответствии с выводами релятивистской электродинамики равна

$$dE_x = 9 \cdot 10^{11} \sigma_k v \frac{x + v\tau}{N} d\tau, \quad (3)$$

где

$$N = \sqrt{\beta} \left\{ \frac{(x \pm v\tau)^2}{\beta} + d^2 + b^2 \right\}^{-\frac{3}{2}}, \quad \beta = 1 - \frac{v^2}{c^2},$$

где  $d$  и  $b$  — размеры, показанные на рис. 4;  $\tau$  — время пробега заряда  $\sigma_k dx$  на линии.

Напряженность поля  $E_x$  от прямоугольной системы зарядов  $\sigma_k dx$  равна интегралу, распространенному от 0 до  $t$ . Интегрирование приводит к соотношению

$$E_x = 9 \cdot 10^{11} \sigma_k \frac{3}{\sqrt{(x \pm vt)^2 + d^2}}, \quad (4)$$

которое должно быть подставлено в (2).

Влияние земли учитывается зеркальным изображением линий. Для зеркального изображения волны формула для  $E_x$  имеет обратный знак и вместо расстояния  $d_{12}$  подставляется  $d'_{12}$ .

Нас в первую очередь интересует значение напряжения в точке возникновения волны ( $x = 0$ ). Решение неоднородного волнового уравнения (2) для  $x = 0$  имеет вид

$$U_{q,x=0} = -c \int_0^t d\tau \int_0^{c(t-\tau)} \frac{\partial E_x}{\partial x} dx = \\ = -c \int_0^t d\tau \int_0^{c(t-\tau)} E_x. \quad (5)$$

Областью интегрирования  $E_x$ , согласно решению (5), является треугольник  $ABC$  (рис. 5). Однако, учитывая запаздывание, следует положить  $E_x = 0$  для точек  $x > ct$ . Проводим лучи  $OD$  и  $OE$ , определяемые уравнениями  $x = \pm ct$ . Нетрудно найти, что точки  $D$  и  $E$  имеют координату  $\frac{t}{2}$ . Напряженность поля  $E_x = 0$  как на оси  $t$  ( $x = 0$ ), так и на прямых  $x = \pm ct$  (начало фронта электромагнитной волны). Следовательно, областью интегрирования  $E_x$  является заштрихованный треугольник  $DAE$ .

Подставляя значение  $E_x$  в (5) и интегрируя, находим  $U_q = f(t)$ . С момента  $t=0$ ,  $U_q$  быстро растет и за время порядка долей микросекунды достигает установившегося значения. Физически этот процесс объясняется так: в начальные моменты времени линия связи свободна от зарядов. В дальнейшем подтекание зарядов ведет к подъему  $U_q$ . В установившемся режиме на фронте прямоугольной волны создается порог  $E_x$ , подпирающий неизменное значение  $U_q$  на проводе «связи».

Установившееся значение  $U_q$  определяется соотношением

$$U_q = -2 \cdot 9 \cdot 10^{11} \sigma_k \ln \frac{d'_{12}}{d_{12}} \cdot \left(1 - \frac{v}{c}\right). \quad (6)$$

Здесь  $d'_{12}$  и  $d_{12}$ —размеры, указанные на рис. 4.

Потенциал  $U_q$  создается в точке  $x=0$  зарядами  $q$ , индуцированными на проводе связи. Поле зарядов  $Q_k$ , вследствие большой протяженности волны создает на проводе связи потенциал:

$$U_Q = 2 \cdot 9 \cdot 10^{11} \sigma_k \ln \frac{d'_{12}}{d_{12}}.$$

Суммарный потенциал провода равен  $U_{np} = U_q + U_Q$ . Замечая, что  $\sigma_k v = ik$  и

$$\frac{2 \cdot 9 \cdot 10^{11}}{c} \ln \frac{d'_{12}}{d_{12}} = z_{12},$$

где  $z_{12}$ —взаимное волновое сопротивление, находим окончательно

$$U_{np} = ik z_{12}. \quad (7)$$

Поскольку весь вывод был сделан для прямоугольной волны  $\Delta U$ , при произвольных скоростях  $v \leq c$ , соотношение (7) справедливо и для волн с фронтом с существенно большим временем установления  $U_q$ , т. е. для волн с фронтом порядка нескольких микросекунд и выше.

Найденное соотношение показывает, что напряжение на проводе связи численно определяется магнитной индукцией тока индуцирующей волны.

С физической точки зрения полученный результат означает, что в установившемся режиме на проводе связи имеет место полная компенсация продольного электрического поля  $E_x$ , за вычетом э. д. с., наводимой током индуцирующей волны.

В случае, если индуцирующая волна распространяется по системе линий (например, по двум линиям), то  $z$  в уравнении (7) означает взаимное волновое сопротивление этой системы с изолированным проводом, на котором определяется индуцированное напряжение.

**Коэффициент связи троса с проводом.** В расчетах защитного уровня линий передачи при прямом ударе молнии в трос напряжение, действующее на изоляцию линии, определяется как разность  $U_{mp} - U_{np}$ . При известном

$U_{mp}$  напряжение  $U_{np}$  задается так называемым коэффициентом связи  $k = \frac{U_{np}}{U_{mp}}$ .

При высоких напряжениях, характерных для прямого удара молнии, развивается интенсивная корона, и коэффициент связи растет с повышением напряжения. В задачу многих исследований входило определение закономерностей этого возрастания. Принято коэффициент связи определять в электростатическом режиме на отрезках проводов [Л. 2, 3, 8]. Такой метод определения  $k$  считался настолько бесспорным, что на его основе были сделаны далеко идущие выводы. С. Л. Зайенц и М. В. Костенко [Л. 4] на основе изучения траекторий разрядов в электрическом поле троса пришли к заключению о «пассивной» роли провода в развитии разряда с троса; разрядное напряжение определяется по промежутку трос—земля, а не по промежутку трос—провод. В обстановке опыта, поставленного С. Л. Зайенцем и М. В. Костенко, такая закономерность физически объясняется отсутствием зарядов на проводе связи, по крайней мере, до начала развития искрового разряда.

В динамическом поле волны на тросе при наличии короны (импульсная корона является первой стадией искрового разряда) на проводе индуцируются заряды, которые подтягиваются неподвижным коронным чехлом. Лишь в первые моменты времени заряды на проводе близки к нулю. Уже в течение нескольких десятых долей микросекунды (порядка 0,5 мксек) процесс достигает установившегося значения и за время прихода отраженных от ближайших опор волн коэффициент связи трос—провод определяется, как было выведено, магнитным полем волны на тросе. Следовательно, развитие разряда непосредственно между тросом и проводом принципиально возможно.

Ток волны на тросе при наличии короны  $i_k = \sigma_k v$ . Находим коэффициент связи трос—провод:

$$\frac{k_k}{k_0} = \frac{i_k z_{12}}{i_0 z_{12}} = \frac{v \sigma_k}{c \sigma_0} = \frac{v}{c} \cdot \frac{k^*_k}{k_0}. \quad (8)$$

Здесь индекс  $k$ —указывает на наличие короны; 0—на отсутствие короны;  $k^*_k$ —коэффициент связи в динамическом режиме; звездочкой отмечается коэффициент связи в электростатическом поле. Справедливость равенства  $\frac{\sigma_k}{\sigma_0} = \frac{k^*_k}{k_0}$  была показана [Л. 3]. Таким образом, в динамическом режиме в численное отношение электростатических коэффициентов связи должна быть введена поправка на отношение  $\frac{v}{c}$ .

Имеется возможность сопоставления полученных соотношений с экспериментальными данными. Коэффициент связи  $k_k$  в волновом режиме на реальных линиях измерялся в работе А. К. Потужного и С. М. Фертика [Л. 5]; электростатический коэффициент связи  $k^*_k$  на

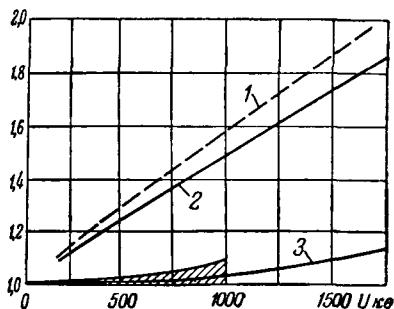


Рис. 6.

1-кривая  $\frac{k_k^*}{k_0} = 1 + BU$ ;  $B$ -по формуле Гей и

Зайенца для  $h=9,5$  м; 2-кривая  $\frac{k_k^*}{k_0}$  по [Л. 8] для

$h=9,15$  м; 3-кривая  $\frac{k_k}{k_0}$  по опытным данным Фертика и Потужного (линия 110 кв). Ориентальная полярность волны.

моделях—в работе В. В. Гей и С. Л. Зайенца [Л. 3] и в натуральном масштабе в работе Мак-Канна [Л. 8].

Опытные данные В. В. Гей и С. Л. Зайенца, и Мак-Канна, пересчитанные на линейные марки проводов, весьма близки друг к другу. На рис. 6 показаны соответствующие кривые для отрицательной полярности волны при средней высоте линии ХЭТИ  $h=9,5$  м (нижняя точка подвеса—7 м; верхняя—12 м). Расхождение между

кривыми  $\frac{k_k^*}{k_0}$  и  $\frac{k_k}{k_0}$  слишком велико, чтобы это можно было объяснить случайными погрешностями измерения.

Для известных  $\frac{k_k^*}{k_0}$  и  $\frac{k_k}{k_0}$  по соотношению (8) может быть определена скорость  $\frac{v}{c}$ .

С другой стороны, есть возможность определения  $\frac{v}{c}$  непосредственно по осцилограммам затухания волн в опытах А. К. Потужного и С. М. Фертика [Л. 5].

На рис. 7 нанесены расчетная кривая  $\frac{v}{c} = \frac{k_k}{k_0} : \frac{k_k^*}{k_0}$  и граничные экспериментальные

кривые  $\frac{v}{c}$ . Совпадение кривых подтверждает справедливость соотношения (8).

Отношение  $\frac{k_k}{k_0}$  равно  $\frac{i_k}{i_0}$ . Было показано [Л. 1], что в пределах напряжения 1000 кв (на линиях 110 кв)  $i_k \approx i_0$ . Следовательно, в первом приближении в указанных пределах  $\frac{k_k}{k_0} = 1$ .

На рис. 6 заштрихована область, лежащая между первым и вторым приближением аналитического решения  $\frac{k_k}{k_0} = \frac{i_k}{i_0}$ . Экспериментальная кривая  $\frac{k_k}{k_0}$  проходит в пределах этой области.

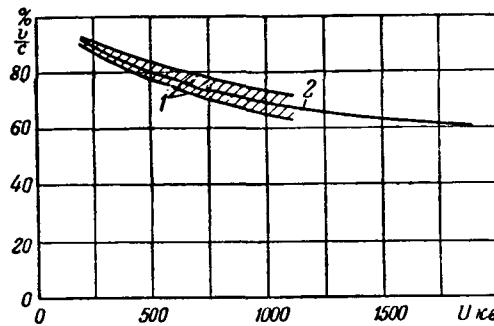


Рис. 7.

1—граничные кривые  $\frac{v}{c}$  по осциллографам;

2 — кривая  $\frac{v}{c}$  по расчету  $\left( \frac{v}{c} = \frac{k_k}{k_k^*} \right)$ .

Отрицательная полярность волны.

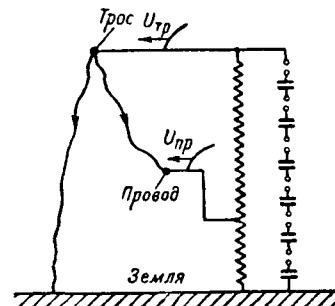


Рис. 8.

Схема определения вероятности искрового разряда трос-провод.

При определении вероятности перекрытия изоляции в пролете в случае прямого удара молнии в трос задается обычно ток молнии  $i_k$ , протекающий в тросах. Напряжение на тросе равно  $U_{tp} = i_k z_k$ , где  $z_k$  определяется по кривой [Л. 1]; потенциал провода  $U_{np} = i_k z_{12}$ .

Напряжение, действующее на изоляцию трос-провод,  $U_{uz} = i_k (z_k - z_{12})$ . Импульсная характеристика должна определяться как вероятность перекрытия с тросом на провод в заданной системе трос-провод-земля и при заданных расчетом потенциалах  $U_{tp} = i_k z_k$  и  $U_{np} = i_k z_{12}$  (рис. 8).

Пример. Ток в тросе равен 15 ка; взаимное волновое сопротивление  $z_{12} = 125$  ом;  $z_k = 500$  ом. Имеем  $k_0 = 0,25$ . В соответствии с кривой  $z_k(u)$  [Л. 1] находим  $U_{tp} = 5700$  кв. Потенциал провода в волновом режиме равен  $U_{np} = i_k z_{12} = 1875$  кв;  $U_{uz} = 5700 - 1875 = 3825$  кв. Коэффициент связи  $k_k = 0,33$ .

В то же время электростатический коэффициент связи при экстраполяции опытных данных превышает 0,7.

**Индуктированные напряжения на линиях с потерями в земле.** Появление продольной составляющей поля  $E_x$ , в волновом процессе при наличии потерь на корону или вообще потерь в проводе физически вытекает из условия покрытия потерь в проводе потоком электромагнитной энергии, направленным к проводу. При направлении вектора Умова-Пойнтинга  $S_q$  к проводу,  $E_x$  направлено вдоль линии так, как это показано на рис. 9, а. Под действием поля  $E_x$  на проводе связи к точке  $x=0$  подтекают заряды, отрицательные по отношению к индуцирующей волне. В силу закона сохранения количества электричества этот процесс должен приводить к образованию на фронте волны избытка положительных зарядов. Это подтверждается решением основного дифференциального уравнения (2) для  $x > vt$ .

Обратимся теперь к волновому процессу на линии с активными потерями в земле. И в этом случае наличие потерь приводит к искажению плоского характера электромагнитного поля. Осциллографмы Бьюли [Л. 6] показали, что на фронте индуцируемой волны обра-

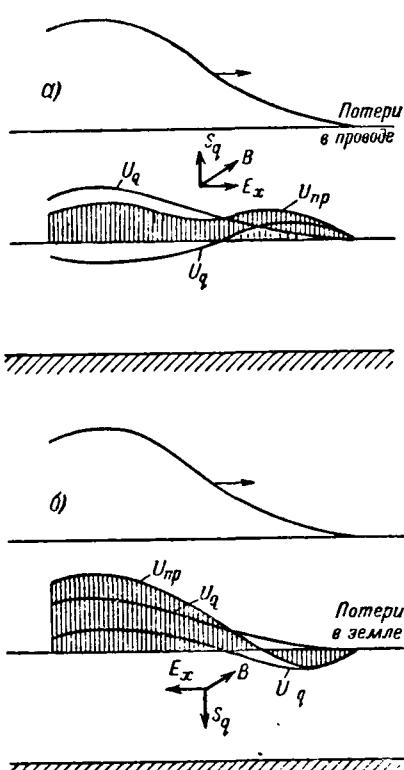


Рис. 9. Формы волн индуктированных напряжений при потерях в проводе и в земле.

зуется отрицательный пик напряжения. В объяснение этого эффекта Бьюли предложил так называемую многоскоростную теорию; известна и неоднократно подчеркивалась в нашей литературе физическая неприемлемость основных положений этой теории.

На рис. 9, б показано направление составляющей вектора Умова-Пойнтинга  $S_q$  в случае активных потерь в земле (провод без потерь). В соответствии с этим направлением  $S_q$  продольная составляющая  $E_x$  направлена вдоль провода, в отрицательном направлении. Таким образом, процесс индукции зарядов на проводе связи обратен случаю волн на линии с потерями на корону. К источнику волны подтягиваются заряды того же знака, что и знак индуцирующей волны (рис. 9, б); на фронте волны возникает пик отрицательного напряжения, удлиняющийся по мере распространения волны. За отрицательным пиком положительные наведенные заряды приводят к повышению индуцируемого напряжения  $U_{np} = U_q + U_Q$ , что обусловливает возрастание коэффициента связи, опять-таки по мере возрастания пути пробега волны. Все эти выводы качественно полностью соответствуют экспериментальным наблюдениям.

Предположение о наличии отрицательного пика напряжения на фронте волны на линии с потерями на корону привело бы, на основании бесспорных физических соображений (закон сохранения заряда), к появлению положительного заряда на проводе связи, у источника



Рис. 10. Расчетная схема напряжений, индуцированных на линии главным разрядом молнии.

волны. Однако, это означало бы возрастание динамического коэффициента связи по сравнению с электростатическим, что противоречит экспериментальным данным.

**Напряжения, индуцируемые на линии током в канале молнии.** Наши знания о структуре разряда молнии позволили в настоящее время пересмотреть старые представления о возникновении напряжений, индуцированных на проводах током молний. Проф. Л. И. Сиротинский так описывает возникновение индуцированных перенапряжений [Л. 6]: заряды лидера, спускающиеся достаточно медленно от облака к земле, индуцируют на проводе связанный заряд; главный разряд, нейтрализуя с большой скоростью заряды лидера канала, освобождает заряды на проводе и создает подъем напряжения, сопровождающийся волновым процессом.

Если через  $\sigma$  обозначить плотность заряда лидера, а через  $v$  скорость главного разряда, то можно положить ток молнии  $i = \sigma v$  [Л. 7].

Исследования Шонланда показали, что скорость главного разряда, достигая вблизи земли максимальных значений (порядка  $1/3$  скорости света), спадает по мере продвижения к облаку. Что касается распределения плотности зарядов в канале лидера, то огромное падение потенциала от облака к головке лидера при относительно малом изменении с высотой удельной емкости канала лидера, должно приводить к спаданию  $\sigma$  от облака к земле. Это иллюстрирует рис. 10, где показано образование токовой волны, в частности ее фронт. Придерживаясь подобной рабочей гипотезы и принимая для упрощения косоугольное нарастание  $\sigma$  и постоянство скорости  $v$  на фронте волны (т. е. вблизи земли), можно оценить амплитуду индуцированных напряжений на проводах линий передачи.

С разрядной волной главного канала связано разрушение электрического поля лидера и возникновение магнитного поля тока молнии. При значении  $v < \frac{1}{3}$  с можно считать релятивистскую поправку  $\beta = 1$  и пренебречь запаздыванием. Такое допущение в системе уравнений электромагнитного поля означает необходимостьдельного рассмотрения электрического и магнитного поля волны тока молнии.

Разрушение электрического поля на фронте волны приводит к постепенному (а отнюдь не мгновенному) высвобождению зарядов на проводе, растекание которых по линии служит фактором, снижающим индуцированное напряжение в точке  $x=0$  (рис. 10). В то же время

магнитное поле тока молнии препятствует этому растеканию. Сила, удерживающая заряды, равна  $q(E_x + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial t})$ . Таким образом, напряжение, индуцированное на линии как электрическим, так и магнитным полем тока молнии, связано с зарядами на проводах.

При малой высоте линии  $h$ , поле у земли приближенно можно считать равномерным.

$$\text{Тогда } E_x^* = E_x + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial t} = h \frac{\partial}{\partial x} \left[ E_y + \frac{\partial B}{\partial t} dx \right].$$

Преобразуем основное дифференциальное уравнение (2) волнового процесса на изолированной линии. Перенося  $\frac{\partial E_x^*}{\partial x} = \frac{\partial^2 U_n}{\partial x^2}$  в левую часть и обозначая  $U_n^* + U_q = U_{cb}$ , приходим к уравнению

$$\frac{\partial^2 U_{cb}}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 U_{cb}}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 U_n^*}{\partial \tau^2}, \quad (9)$$

откуда

$$U_{cb} = \frac{1}{c} \int_0^{ct} dx \left| \frac{\partial U_n^*}{\partial \tau} \right|^2. \quad (10)$$

В поле разрядной волны тока молнии составляющая  $U_{cb}$  и является напряжением  $U_{ind}$ , индуцированным на изолированной линии. Подставляя в (10)  $U_n^* = h \left[ E_y + \frac{\partial B}{\partial t} dx \right]$  и решая интеграл, получаем, при допущении  $b$  и  $h \ll vt$  (рис. 10) и  $1 + \frac{v}{c^2} \approx 1$ , упрощенную формулу для  $U_{ind} = U_{cb}$

$$U_{ind} = 60 i \frac{h}{vt_{\phi p}} \left[ 1 + \frac{v}{c} \ln \frac{2vt_{\phi p}}{b} \right]. \quad (11)$$

Здесь  $h$  и  $b$  — размеры, показанные на рис. 10. Заданы параметры тока молнии  $i$  и длина фронта  $t_{\phi p}$ .

Второй член в скобках учитывает повышение  $U_{ind}$  вследствие магнитного поля тока молнии.

Формула (11) выведена для случая прямого удара молнии в непосредственной близости от линии, когда расстояние  $b$  мало (например — прямой удар молнии в стержневой молниевывод).

**Пример.** Ток молнии  $i = 100 \text{ ka}$ ; длину фронта  $t_{\phi p}$  примем равной 4 мксек;  $v = \frac{1}{5} c$ ;  $h = 10 \text{ м}$ ;  $b = 5 \text{ м}$ .

$$\text{Тогда } U_{ind} = 60 \cdot 100 \frac{10}{60 \cdot 4} \left[ 1 + \frac{1}{5} \ln \frac{2 \cdot 60 \cdot 4}{5} \right] \approx 475 \text{ кв.}$$

Определим защитное действие тросов при индуцированных напряжениях. Расчетная схема приведена на рис. 11. Включая в рассечку заземления троса два «генератора»  $+U_{mp}$  и  $-U_{mp}$

рассмотрим схему с изолированным тросом  $+U_{mp}$  (схема А) и схему, в которой при отсутствии внешних полей к тросу подключен «генератор»  $-U_{mp}$  (схема Б).

Обозначая индуцированное напряжение на проводе через  $U_{np}$  и принимая, согласно (11), индуцированное напряжение пропорциональным высоте линии, находим напряжение на тросе в схеме А

$$U_{mp} = U_{np} \frac{h_{mp}}{h_{np}}.$$

Схема Б с подключенным источником напряжения дает на проводе потенциал  $-k_0 U_{mp}$ . Суммируя, находим искомое значение индуцированного напряжения на проводе при наличии троса:

$$U_{np}^* = \left( 1 - k_0 \frac{h_{mp}}{h_{np}} \right) U_{np}. \quad (12)$$

Трос примерно вдвое снижает индуцированные перенапряжения на линиях электропередачи.

Соотношение (12) имеет преимущество простоты и наглядности по сравнению с выводом Двайта [Л. 6].

**Выводы.** Изложенная теория индуцированных напряжений вносит существенные корректировки в методику расчета грозоупорности линий передачи. Показывается, что коэффициент связи в волновом режиме определяется магнитной индукцией индуцирующей волны. Погрешность существующей методики, определяющей коэффициент связи по электростатической индукции, заключается в неучете искажения плоского характера волны на линии с потерями. Выводятся далее соотношения для напряжений, индуцируемых током в канале молнии, и показывается необходимость учета в расчетах грозоупорности линий передачи как электрической, так и магнитной индукции тока молнии. Защитное действие троса при индуцированных перенапряжениях определяется по коэффициенту связи троса с проводом.

Изложенные в статье методы пригодны для расчета неплоских электромагнитных полей и в общем случае, при условии заданной кривой скорости фазы напряжения  $U = \text{const}$ .

#### Литература

- А. И. Долгинов. Волновые характеристики линии при высоких напряжениях. Электричество, № 9. 1949.
- Л. Е. Машкиллейсон и др. Исследование импульсной короны. Труды ЛПИ, № 2, 1941.
- В. В. Гей и С. Л. Зайенц. Зависимость коэффициента связи от напряжения. ЖТФ, № 9, 1947.
- С. Л. Зайенц и М. В. Костенко. Удар молнии в середину пролета троса линии электропередачи. Электричество, № 6, 1947.
- А. К. Потужный и С. М. Фертик. Затухание блуждающих волн на 110 кв линиях. Электричество, № 6, 1945.
- Л. И. Сиротинский. Техника высоких напряжений, ч. III. Госэнергоиздат, 1946.
- И. С. Стекольников. Физика молнии и грозозащита. Изд-во АН СССР, 1943.
- М. Сапп. AIEE, стр. 848, 1943.

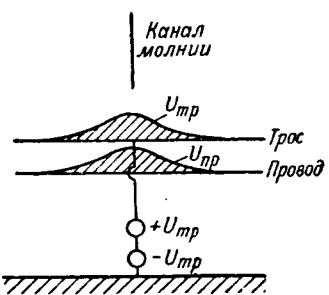


Рис. 11. Схема расчета защитного действия троса при индуцированных перенапряжениях.

# Устойчивость синхронного генератора при работе от ветродвигателя на мощную сеть

Кандидат техн. наук В. Н. АНДРИАНОВ

Москва

В связи с появлением ветродвигателя Д-18 конструкции ВИМЭ-ГУСМП, удостоенной Сталинской премии, вплотную встал вопрос о более широком использовании энергии ветра для целей электрификации сельского хозяйства. При этом параллельную работу на общую сеть следует рассматривать как основной метод работы ветроэлектрических станций. Экспериментальные исследования в этой области, произведенные до войны под руководством Г. Х. Сабинина, остались незавершенными в части выводов о практических возможностях работы на сеть синхронного генератора от ветродвигателя. Преимущественно применяемым типом генератора на всех остальных видах установок является синхронный генератор, заманчиво поэтому внедрить его и на ветроэлектрической установке. Этот вопрос будет приобретать все большую актуальность по мере роста мощности в одном агрегате. Между тем, распространено мнение, что синхронный генератор плохо приспособлен к свойствам ветродвигателя, основанное, главным образом, на опасении относительно недостаточной устойчивости синхронного генератора при порывах ветра. Этот вопрос, не единственно определяющий работу подобной ветроэлектрической установки, но, несомненно, один из основных и рассмотрен ниже. Наряду с теоретическим анализом дано применение его результатов к синхронному генератору, работающему от ветродвигателя Д-18 параллельно на мощную сеть.

Ветродвигатель Д-18 принадлежит к типу быстроходных, регулирование осуществляется поворотом конца лопасти около оси маха при помощи стабилизатора. Мощность ветродвигателя Д-18 составляет 28,5 квт при расчетных значениях  $n = 42$  об/мин и скорости ветра  $v = 8$  м/сек. Если учесть потери в передачах от

исследована теоретически работа синхронного генератора на мощную сеть при непосредственном соединении с ветродвигателем. Дан способ определения предельно допустимой скорости ветра, при которой сохраняется устойчивая работа. Анализически исследованы условия работы регулирования на ветроэлектрической станции с синхронным генератором. Показано, что при осуществлении определенного комплекса мероприятий можно достигнуть устойчивой работы на сеть синхронного генератора при непосредственном соединении с ветродвигателем в практических условиях работы ветроэлектрической установки в районах со среднегодовой скоростью ветра до 6 м/сек.

ветроколеса до установленного внизу генератора, то подводимая к валу последнего мощность оказывается равной 23,2 квт, в соответствии с чем для примерных расчетов выбран синхронный генератор СГ-25/6.

**Аэродинамический режим ветродвигателя.** При работе ветродвигателя с генератором переменного тока в случае параллельной работы его с сетью при изменении скорости ветра предполагается работа ветродвигателя при переменном значении модуля  $z = \frac{\omega R}{v}$ , где  $\omega$  — угловая скорость ветроколеса,  $R$  — его радиус,  $v$  — скорость ветра. В случае применения синхронного генератора режим работы ветродвигателя следует выбирать не только по условию наибольшей выработки энергии за определенный период, но и также руководствуясь соображением о необходимости создания относительно благоприятных условий перехода генератора от одной нагрузки к другой при изменении скорости ветра.

Установившиеся режимы работы ветроустановки при различных скоростях ветра определяются пересечением характеристик ветродвигателя  $M = f(n)$  (рис. 1) с вертикальной характеристикой синхронного генератора.

То или иное расположение вертикали на графиках  $M = f(n)$  приведет к различным изменениям момента при переходе с кривой, соответствующей одной скорости ветра, на другую. Эти изменения для ветродвигателя Д-18, рассчитанные по кривым рис. 1, даны в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что по мере передвижения по характеристикам влево — в сторону меньших значений  $n$  (рис. 1) как бы все более проявляется эффект саморегулирования ветродвигателя. На это обстоятельство обратил внимание Г. Х. Сабинин в 1931 г. Это благоприятно для

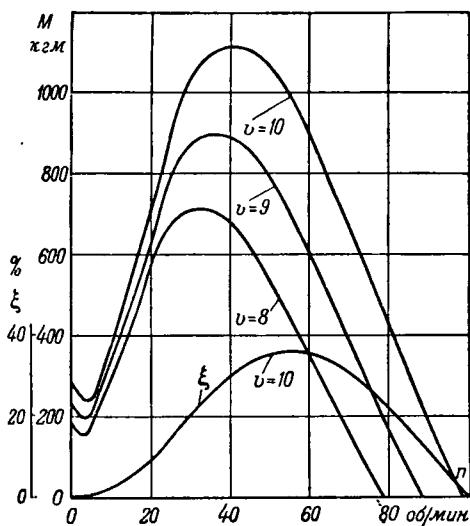


Рис. 1.

Таблица I

Отношение момента ветродвигателя при некоторой скорости ветра к моменту при  $v=8$  м/сек при различных значениях  $n$

$n$ , об/мин и сек	42	37,5	35	30	27	24
9	1,34	1,28	1,27	1,23	1,20	1,16
10	1,68	1,58	1,55	1,45	1,38	1,29
11	2,03	1,88	1,82	1,65	1,53	1,43
12	2,39	2,18	2,05	1,81	1,62	1,52

инхронного генератора как в отношении его стойчивости при переходе к новому режиму, так и опасности перегрузки на высоких скоростях ветра. В точках, лежащих на левых частях характеристик, избыточный момент со стороны ветродвигателя вызывает ослабление степени затухания колебаний, возникающих при переходе в свое состояние равновесия. С этой стороны целесообразность перенесения режима работы на ту часть характеристики может быть поставлена под сомнение. Однако, количественный анализ этого процесса показал неосновательность таких опасений.

Обычно нормальная рабочая точка выбирается по характеристике ветродвигателя так, что она соответствует близкое к наивысшему значению коэффициента использования энергии ветра  $\xi$ . Перемещение вертикали, определяющей режим работы, в сторону пониженных значений  $n$  (рис. 1), означая уменьшение модуля, влечет за собой то, что при всех скоростях ветра, равных и больших расчетной, коэффициент использования  $\xi$  падает. Вместе с тем, для скоростей ветра, меньших расчетной, это же уменьшение модуля проводится увеличением коэффициента использования  $\xi$ . Кроме того, вследствие снижения же нормальной мощности ветродвигателя при скорости ветра, принятой первоначально за расчетную, скорость ветра, по достижении которой должно вступать в действие регулирование, должна быть соответственно повышена. В табл. 2 дана выработка энергии для ветродвигателя Д-18

при различных режимах работы и среднегодовых скоростях ветра. Повторяемость скоростей ветра принята для первых двух случаев по Поморцеву, для третьего — по Гуллену.

Таблица 2

Годовая выработка энергии на зажимах генератора, квт·ч

Синхронный генератор	Среднегодовая скорость ветра, $v_{cp}$ , м/сек	Синхронное число оборотов по ветроколесу, об/мин						
		42	37,5	35	32,5	30	27	24
СГ-25/3	4	28 150	31 140	31 370	31 700	31 383	29 815	26 920
	5	52 470	55 380	54 830	54 860	53 340	49 218	42 986
СГ-35/3	6	81 385	82 450	81 170	81 640	78 026	60 745	52 500

Расчетная скорость ветра, после которой должно вступить в действие регулирование (м/сек)

$v_{cp}=4$ или 5	8,0	8,25	8,35	8,7	9,25	11	—
$v_{cp}=6$	9,2	9,6	9,95	10,3	11,8	15	22

Табл. 1 и 2 подтверждают то положение, что на известном диапазоне характеристики ветродвигателя  $M = f(n)$  соображения о получении более устойчивой работы генератора вполне могут быть увязаны с требованием получения максимальной выработки. Не исключена и такая возможность, что ветродвигатель до больших скоростей ветра окажется способным работать без регулирования, особенно, если при этом пойти на некоторое снижение выработки. Во всех случаях, начиная с  $n = 30$  об/мин, увеличивается число часов работы ветроустановки в году за счет использования малых ветров. Это обстоятельство может иметь некоторое значение для большей равномерности участия ветроэлектростанции в общей работе.

**Процесс колебаний генератора.** Для исследования процесса перехода ротора на режим работы при новой скорости ветра первоначально сделано предположение о мгновенном изменении скорости ветра. Процесс колебаний целесообразно рассматривать относительно того положения ротора, к которому он должен прийти в результате произошедшего изменения режима ветра. При переходном процессе избыточный момент  $M_1 - M_0$  ускоряет ротор. Здесь  $M_0$  — момент ветродвигателя, переданный валу генератора, за вычетом момента потерь в стали и механических, соответствующий режиму, предшествовавшему толчку ветра,  $M_1$  — то же, соответственно новому значению скорости ветра. Под влиянием этого избыточного момента возникает процесс движения ротора, характеризуемый известным дифференциальным уравнением:

$$\frac{J}{p} \cdot \frac{d^2\omega}{dt^2} + D \frac{d\omega}{dt} + M_c \alpha = 0, \quad (1)$$

где  $\frac{J}{p} \cdot \frac{d^2\alpha}{dt^2}$  — момент, необходимый, чтобы сообщить ускорение вращающимся частям, момент инерции которых  $J$ ;

$D \frac{d\alpha}{dt}$  — демпферный момент;

$M_c p$  — синхронизирующий момент;

$\alpha$  — угол пространственного отклонения ротора от положения равновесия, выраженный в электрических градусах.

Период собственных колебаний с учетом затухания [Л. 1]

$$T = \sqrt{\frac{2\pi}{M_c p - \frac{D^2 p^2}{4J^2}}} = \sqrt{\frac{T_0}{1 - a^2}}, \quad (2)$$

где  $T_0$  — период собственных колебаний без учета затухания

$$a = \frac{30}{2\pi n S_\mu} \cdot \sqrt{\frac{M_\mu \cdot \cos \varphi}{J \cdot p k \cos \delta}} \quad (\text{приложение 1}).$$

Формула дана в виде, легко применимом для практических расчетов. Для агрегата, состоящего из синхронного генератора СГ-25/6 и ветродвигателя Д-18, период собственных колебаний, вычисленный для случая наличия на роторе демпферной клетки, рассчитанной так, что асинхронный момент, ею создаваемый, при  $S_\mu = 0,05$  равен номинальному моменту генератора в синхронном режиме оказался равным  $T_s = 2,075$  сек., в то время как период собственных колебаний самого генератора  $T_0 = 0,213$  сек. Как и следовало ожидать, на величину периода собственных колебаний масса ветроколеса оказалась большое влияние. Величина  $a$  получается настолько малой, что можно не делать различия между периодом собственных колебаний ветроагрегата при и без учета затухания (приложение 2).

Из выражения (1) следует

$$\alpha = -\alpha_1 \cdot e^{\frac{t}{T_3}} \cos \omega t, \quad (3)$$

где постоянная времени затухания экспоненциальной кривой  $T_3 = \frac{2J}{Dp}$ .

Большая масса ветроколеса значительно замедляет затухание колебаний. Для ветроагрегата Д-18 постоянная времени затухания (приложения 1 и 2) оказалась равной  $T_3 = 5,25$  сек. Оценивая продолжительность процесса примерно учетверенной величиной электромагнитной постоянной времени, получаем, что ротор вместе с ветродвигателем после одного резкого толчка, вызванного изменением ветрового режима, придет в положение нового равновесия приблизительно через 21 сек.

Величина наблюдаемой перегрузки определяется максимальным отклонением  $\alpha$  пространственного положения ротора в процессе коле-

баний [уравнение (3)]. При первом отклонении вперед ротор переходит положение нового пространственного равновесия на угол

$$\alpha_m = e^{\frac{t}{T_3}} \cdot (\delta_1 - \delta_0).$$

Получающаяся при этом перегрузка генератора по отношению к исходному состоянию определяется отношением  $\frac{\sin \delta_2}{\sin \delta_0}$ , где  $\delta_2 = \delta_1 + \alpha_m$ ;  $\delta_0$  и  $\delta_1$  — соответственно, углы между векторами э. д. с.  $E_0$  и напряжения  $U$  генератора при скорости ветра до ее изменения и в состоянии нового установившегося равновесия.

Для синхронного генератора СГ-25/6, работающего от ветродвигателя Д-18, наибольшая перегрузка при мгновенном изменении скорости ветра от  $v_0 = 8$  м/сек, которая соответствует номинальной мощности генератора, до  $v_1 = 9$  м/сек, составляет 64 %. Следовательно, несмотря на относительно резкое изменение режима, нет оснований опасаться нарушения устойчивости. В действительности протекание процесса будет в этом смысле еще более благоприятным, так как изменение скорости ветра, связанной с величиной энергии ветрового потока, не может происходить мгновенно, как это предполагалось.

**Предельно допустимые перегрузки.** Причиной нарушения устойчивости при внезапно возникающих порывах ветра является возникновение избыточных моментов на валу генератора в результате резких изменений мощности первичного двигателя. Вследствие большой массы ветроколеса процесс изменения угла при колебаниях синхронного генератора, соединенного с ветродвигателем, необычно замедлен и период колебаний значительно больше постоянной времени обмотки возбуждения  $T > T_s$ . Это позволяет не принимать во внимание воздействия на соответствующие поля токов, возникающих в демпферной обмотке, полюсных башмаках и обмотке возбуждения, и считать, что величины э. д. с. за синхронным реактивным сопротивлением  $E_0$  и самого синхронного реактивного сопротивления остаются при колебаниях постоянными. Иными словами, для исследования процесса изменения угла допустимо использовать неменяющуюся статическую характеристику мощности, при которой генератор представлен синхронным реактивным сопротивлением. Применяя правило площадей и используя характеристики ветродвигателя, не трудно найти числовое значение скорости ветра, по достижении которой в предположении резкого изменения состояния нарушается устойчивость генератора. Эта скорость ветра названа предельно допустимой.

Для синхронного генератора СГ-25/6, соединенного с ветродвигателем Д-18, предельно допустимые скорости ветра при мгновенном характере его изменения приведены в табл. 3. До нарушения режима предполагалось, что генератор работает при номинальной мощности и  $\cos \varphi = 0,8$ , чему соответствовало значение  $\delta_\mu = 19,5^\circ$ .

Таблица 3

Предельно допустимые скорости ветра (м/сек)

Синхронная скорость по ветроколесу, об/мин . .	42	37,5	35	32,5	30	27	24
Скорость ветра до изменения режима, м/сек . .	8	8,25	8,35	8,7	9,25	10,5	14,35
Предельно допустимая скорость ветра $v_{np}$ , м/сек . . . .	11,8	13,6	16,5	19,3	24,4	27	31,5
Отношение скоростей $\frac{v_{np}}{v_0}$ . . . .	1,48	1,63	1,98	2,22	2,64	2,57	2,2

Недостаток опытного аэрометрического материала о наиболее вероятных степенях нарастания скорости ветра не позволил дать в дополнение к табл. 3 более вероятные в действительных условиях изменения скорости ветра, допустимые по условиям сохранения устойчивости. Все же для того, чтобы установить, какое влияние на величину предельно допустимой скорости ветра окажет уменьшение резкости порывов, было предположено, что скорость ветра принимает новое значение  $v$ , не мгновенно, а изменяясь плавно, следуя зависимости  $v = v_0 + at$ . Принимались два значения  $a$ : 5,5 м/сек<sup>2</sup> (средние порывы) и 1 м/сек<sup>2</sup> (слабые порывы). При 5,5 м/сек<sup>2</sup> расчет проводился по следующей схеме: время разбивалось на ряд последовательных равных интервалов, скорость ветра принималась на протяжении интервала постоянной и равной скорости в конце интервала. После этого подсчитывалась мощность сперва на ветроколесе  $P_{ed}$ , затем — переданная ветроколесом на генератора  $P'_\phi$ . Далее находилась мощность ускорения  $P'_{\phi} - P_\phi$  и, применяя метод последовательных интервалов, определялся угол в конце интервала. После этого являлось возможным изменение мощности на ветроколесе в времени перенести на график изменения электромагнитной мощности по углу  $\delta$ . Построение следует вести до такого значения  $P_\phi$ , когда, применив метод площадей, угол максимального отклонения ротора получит значение критического (рис. 2, кривая 1). Предельно допустимая скорость ветра оказалась равной  $v_{np} = 12,4$  м/сек, вместо  $v = 11,85$  м/сек в случае мгновенного изменения скорости ветра.

Для случая, когда  $a_2 = 1$  м/сек<sup>2</sup>, нарастание мощности ветродвигателя Д-18 при изменении скорости ветра, оказалось, происходит приблизительно так же, как и изменение электромагнитной мощности синхронного генератора в процессе перехода ротора от одного угла  $\delta$  к другому (рис. 2, кривая 2). Поэтому здесь не оказывается возможным применение метода площадей для определения предельно допустимой скорости ветра. Такой скоростью ветра следует принять ту, которая будет иметь место в мо-

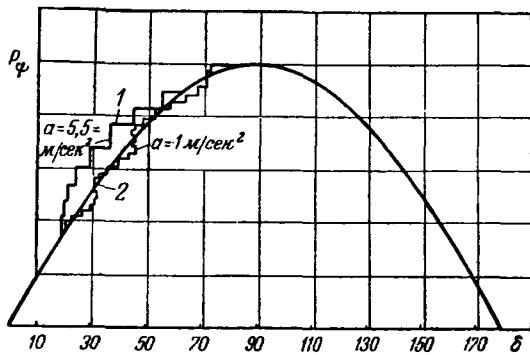


Рис. 2.

мент, когда угол  $\delta$  ротора, постепенно увеличиваясь в процессе отклонения, достигнет некоторого значения  $\delta_{np}$ , близкого к  $90^\circ$ , определяемого тем условием, что кинетическая энергия, которой обладает ротор к этому моменту, обусловит переход на ниспадающую часть статической характеристики. Определить эту точку возможно лишь аналитически, что и было сделано, используя вышеуказанную схему расчета. Предельно допустимая скорость ветра оказалась равной  $v_{np} = 13,4$  м/сек.

Выходы, к которым можно прийти на основе проведенного анализа, сводятся к следующему.

1. Несмотря на крайне широкий диапазон изменения степени нарастания ветра — от  $a = 1$  м/сек<sup>2</sup> до мгновенного изменения ( $a = \infty$ ), значение предельно допустимой скорости ветра меняется в относительно небольших пределах от 13,4 до 11,85 м/сек. Таким образом, при проектировании ветроустановки заранее может быть установлена та величина скорости ветра, до которой при любом характере изменения ветра генератор не выпадет из синхронизма. Зная вероятность и частоту возникновения ветров со скоростями, более высокими, чем предельно допустимая, можно будет судить, как в практических условиях будет протекать работа ветроагрегата и насколько оправданным явится усложнение установки специальными устройствами, предотвращающими выпадение из синхронизма. В настоящее время таким устройством чаще всего считают гидромуфту между генератором и ветродвигателем. Результаты анализа приводят к выводу, что для ветроэлектрических станций на базе ветродвигателя Д-18 с синхронным генератором СГ-25/6 в районах со среднегодовой скоростью ветра  $v_{cp} \ll 5$  м/сек применение гидромуфты по условиям устойчивости не является необходимым.

2. Выбирая в качестве синхронного такое число оборотов в минуту ветроколеса, при котором поминальная мощность (по генератору) развивается не при наибольшем коэффициенте использования ветра, можно значение предельно допустимой скорости ветра повысить в 1,8 раза. Соответственно повышается значение среднегодовой скорости ветра, для которой сохраняется устойчивая работа синхронного генератора при непосредственном приводе от ветродвигателя.

3. Определение предельно допустимой скорости ветра на основе величины статической устойчивости для общего случая дает ошибку порядка 15%.

4. В состоянии нового равновесия (при  $v < v_{np}$ ), если оно окажется не преходящего характера, генератор очутится в режиме перегрузки и перед системой регулирования должна быть поставлена задача снятия излишка мощности. Использовать для осуществления поворота лопастей принцип скоростного регулирования не представляется возможным. Следовательно, действие системы регулирования должно быть основано на каком-то другом принципе. Так, например, может быть применено специальное реле активной мощности, действующее с некоторой выдержкой времени. Воздействуя помостью соленоида на уставку регулирования, можно будет получить новый, требуемый условиями ветрового режима, угол установки лопастей. В предельных случаях перегрузка генератора достигает значительной степени, порядка  $2\frac{1}{2}$ -кратной и потому длительность ее может быть лишь небольшой. Это ставит перед системой регулирования жесткие требования в отношении времени ее действия и исключает применение таких способов, как вывод ветроколеса из-под ветра и т. п. При больших массах, которые следует привести в движение в таких случаях, процесс регулировки потребовал бы значительного времени. Поворот конца лопасти следует рассматривать как единственно практически пригодный способ.

**Угол  $\delta$  при номинальном режиме.** Для выявления влияния на величину предельно допустимой скорости ветра угла  $\delta$ , связанного, как известно, с параметрами генератора, расчеты, указанные в предшествующем разделе, были проведены также для  $\delta_n = 25$  и  $\delta_n = 30$  электрических градусов. Изменение скорости ветра предполагалось мгновенным. Результаты даны в табл. 4.

Таблица 4

Угол $\delta_n$ между э. д.-с. $E_0$ и напряжением при номинальном режиме . . . . .	19,5	25	30
Синхронная скорость по ветроколесу, об/мин . . . . .	42   37,5   30	42   37,5   30	42   37,5   30
Предельно допустимая скорость ветра $v_{np}$ , м/сек . . . . .	11,8   13,6   24,4	11   11,7   17,6	10,1   11   16,1
Момент передаваемый ветроколесом генератору $M$ , $D/e$ . . . . .	2,5	2,0	1,75

При анализе табл. 4 надо иметь в виду ту особенность, что перегрузочная способность синхронного генератора, работающего от ветродвигателя, не находится в прямом соответствии с увеличением энергии ветра. Причина лежит в том, что для ветродвигателя, работающего при переменном модуле, в момент перегрузки коэффициент использования энергии ветра  $\xi$  может изменяться

в различной степени в зависимости от условий, в которые поставлена работа ветродвигателя. Следовательно, одна и та же перегрузка генератора в разных случаях может быть получена при различном диапазоне изменения скорости ветра, т. е. энергии ветра, подводимой к ветроустановке.

При числе оборотов в минуту  $42 \div 37,5$ , переходя на большие углы  $\delta_n$ , ценою сравнительно небольшого снижения предельно допустимой скорости (например, для  $n=42$  об/мин,  $10,1$  м/сек вместо  $11,85$ ) открывается возможность снизить наблюдаемую при этом перегрузку генератора в 1,4 раза. Это объясняется тем, что в данных по скорости условиях работы ветродвигателя при переходе на соответствующие точки характеристик ветродвигателя коэффициент использования энергии ветра меняется мало. Энергия ветра пропорциональна кубу ее скорости и для того, чтобы перегрузка по моменту изменилась в 1,4 раза, скорость ветра должна измениться значительно медленнее.

При работе ветродвигателя Д-18 на синхронной скорости, равной 30 об/мин, являющейся режимом работы на вертикали, расположенной в левой части характеристики  $M=f(\eta)$ , при перегрузках наблюдается резко уменьшение коэффициента использования энергии ветра. Поэтому при  $\eta=1,75$  предельно допустимая скорость должна получиться значительно меньшей, чем при  $\eta=2,5$ . Но так как это же обстоятельство для  $\eta=2,5$  определило высокое значение предельно допустимой скорости  $v_{np}=24,4$  м/сек, то хотя теперь она падает значительно, но по абсолютной величине остается достаточно большой ( $v_{np}=16,1$  м/сек).

Таким образом, возможности в отношении снижения наблюдаемой перегрузки при сохранении достаточно высоких величин предельно допустимой скорости ветра определяемые переходом на большее значение угла  $\delta_n$  полнее реализуются опять-таки при выборе аэродинамического режима работы ветродвигателя на левой части его характеристик.

**Условия работы регулирования.** Ветроустановка характерна той особенностью, определяющей работу регулирования, что вследствие необычно большой величины постоянной инерции процесс колебаний является относительно растянутым во времени. Для уяснения этих условий, в которых должна проходить работа регулирования ветродвигателя, изучалось движение ротора и определялось время достижения критического угла при колебаниях. Применив известный из теории устойчивости метод последовательных интервалов, были рассчитаны и построены кривые  $\delta=f(t)$  и относительной скорости движения генератора  $\omega_s=\varphi(t)$  для трех указанных выше случаев нарастания скорости ветра (рис. 3-8). Из кривых  $\delta=f(t)$  можно определить время действия регулирования. Если в течение этого времени регулирование действует так, что в дальнейшем, когда скорость ветра превысит предельно допустимую, момент ветроколеса передаваемый генератору, все же будет не больше момента, соответствующего предельно допустимой скорости ветра при первоначальном угле установки лопастей, то выпадения генератора из синхронизма не произойдет, хотя бы скорость ветра и превысила значение предельно допустимой.

Основные результаты, полученные из расчетов, свелись к следующему:

Характеристика порыва ветра $a$ , м/сек <sup>2</sup> . . . . .	$\infty$	5,5	1
Наибольшее отклонение скорости от синхронной $\omega_s$ , % . . . . .	2,17	1,73	0,9
Время (сек), в течение которого ротор достигает угла:			
предельного . . . . .	0,45	0,75	6,4
критического . . . . .	2,0	2,4	6,4
Зона нечувствительности при регуляторе чувствительностью:			
1% . . . . .	0,12	0,40	Полная
0,5% . . . . .	0,07	0,17	Полная

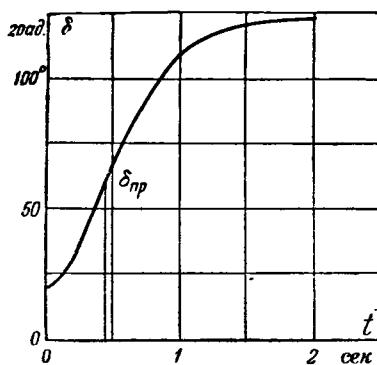


Рис. 3.

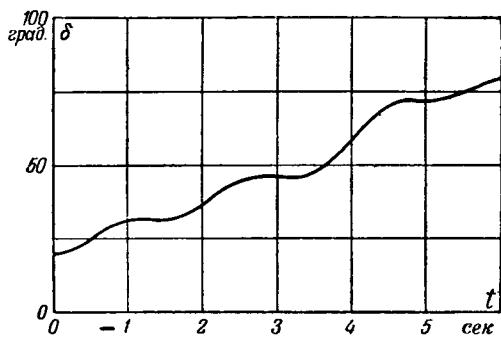


Рис. 5.

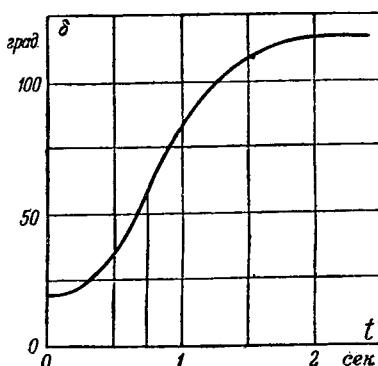


Рис. 4.

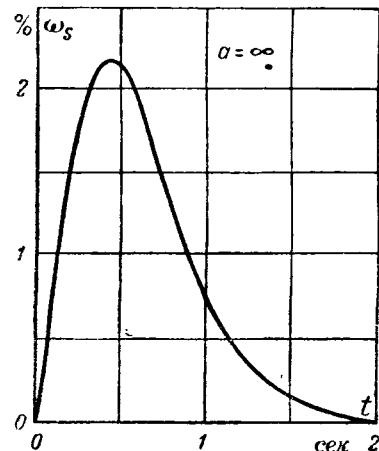


Рис. 6.

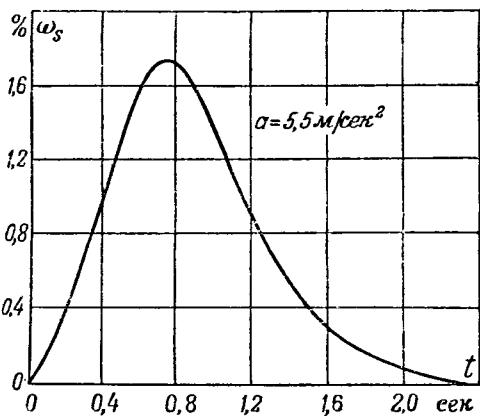


Рис. 7.

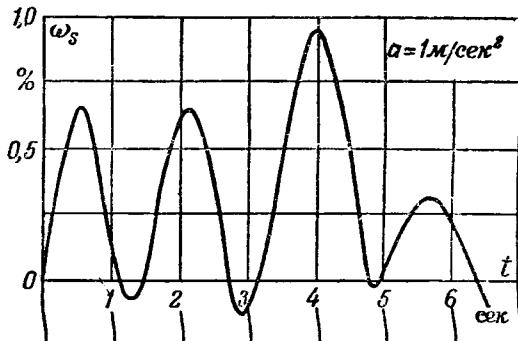


Рис. 8.

Эти результаты приводят к следующим выводам.

Случай  $a=\infty$  и  $a=5.5 \text{ м/сек}^2$ . Регулирование не сможет предотвратить выпадение генератора из синхронизма, если существует вероятность того, что скорость ветра в процессе нарастания может превысить значение предельно допустимой. Причина лежит в недостаточности этого времени, в течение которого регулятор должен пройти в действие. Это время составляет 0,33–0,35 сек. при чувствительности регулятора 1% и 0,38–0,58 сек. при чувствительности 0,5%. Ввиду относительного несовершенства конструктивного выполнения системы аэродинамического регулирования этого времени не хватит, чтобы преодолеть инерцию грузов и осуществить перемещение муфты регулятора и всей связанной с ней кинематической схемы.

Если бы регулятор привел в действие систему регулирования, то, поскольку в целом процесс колебаний про-

текает достаточно продолжительно, при осуществлении регулировки поворотом конца лопасти самый процесс регулирования успеет завершиться прежде, чем для генератора возникнет опасность выпадения из синхронизма. Что же касается других способов регулирования, например, поворотом головки, несущей ветроколесо, или путем опрокидывания ветроколеса [Л. 2] и т. п., то при больших массах, которые следует привести в движение в этих случаях, процесс регулировки потребовал бы времени, значительно большего того, которое характеризует происходящие колебания.

Случай  $a=1 \text{ м/сек}^2$ . Регулятор из-за недостаточной величины наибольшего отклонения скорости не почувствует в этом случае нарушения режима. Но относительно большое время, в течение которого генератор приближается к пределу статической устойчивости, опре-

деляющему в этом случае выпадение из синхронизма, позволяет разрешить задачу регулирования помошью реле активной мощности, как указано было выше.

**Выводы.** 1. Характеристики ветроколеса, предназначаемого для соединения с синхронным генератором, должны быть разработаны с учетом требования создания наиболее благоприятных условий для устойчивой работы синхронного генератора. Это означает, что характеристики  $M=f(n)$  при различных скоростях ветра в своей левой части должны максимально сближаться, вплоть до переплетения. Получение таких характеристик, как показали работы Г. Х. Сабинина, является возможным, но требует выполнения лопасти определенной конфигурации.

2. Характеристики ветродвигателя Д-18 от желаемых в значительной мере отличаются. Тем не менее числовые расчеты теоретически показали возможность устойчивой работы синхронного генератора при непосредственном соединении с ветродвигателем в районах со среднегодовой скоростью ветра меньше или равной 5 м/сек. Такого же положения можно достичь и для районов со среднегодовой скоростью 6 м/сек, но при непременном условии перенесения режима работы на более левую часть характеристик ветродвигателя. При этом возможно будет иметь место некоторое уменьшение выработки энергии.

3. Наиболее благоприятные условия при параллельной работе на относительно мощную сеть как в смысле устойчивости, так и наблюдаемых перегрузок будут достигнуты при осуществлении комплекса мероприятий — выполнение лопасти ветроколеса определенной конфигурации, выбор на характеристике ветродвигателя определенной вертикали режима работы, выбор соответствующего значения угла  $\delta_n$  при номинальном режиме.

#### Приложение 1.

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{M_c p}{J} - \frac{D^2 p^2}{4J^2}}} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{M_c p}{J}} \cdot \sqrt{1 - \frac{p D^2}{4 M_c J}}} = \\ = \frac{T_0}{\sqrt{1 - a^2}},$$

где

$$a = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{p}{M_c J}}.$$

Считая прямолинейной зависимость демпферного асинхронного момента от скольжения, можно написать:

$$D = \frac{1}{\mu \Omega_c} \cdot \frac{M_n}{S_n},$$

где  $\Omega_c$  — синхронная угловая скорость (пространственная)  $M_n$  и  $S_n$  — соответственно номинальный момент и то скольжение, при котором демпферный асинхронный момент равен номинальному.  $S_n$  может считаться заданным.

Удельный синхронизирующий момент

$$M_c = \frac{m}{\Omega} U I_k \cos \delta = M_n k \frac{\cos \delta}{\cos \varphi},$$

где

$$k = \frac{I_k}{I_n}.$$

Тогда

$$a = \frac{M_n}{2p\Omega_c S_n} \sqrt{\frac{p \cos \varphi}{JM_n k \cos \delta}} = \frac{30}{2\pi n S_n} \sqrt{\frac{M_n \cos \varphi}{J p k \cos \delta}}.$$

**Приложение 2.** Для синхронного генератора СГ-25/6 полный электромагнитный момент генератора при номинальном режиме, принимая электрический к. п. д.  $\tau_b = 0,93$ , равен  $M_n = 20,9$  кгм. Маховой момент ротора  $GD^2 = 4,2$  кгм<sup>2</sup>. Приведенный маховой момент ветроколеса Д-18, исходя из принятых веса  $G = 3$  т и радиуса инерции  $r = 0,48$ , равен  $(GD^2)' = 394,5$  кгм<sup>2</sup>,  $\delta_n = 19,5^\circ$  эл.,  $k = 1,345$ .

Тогда

$$a = 0,0626, T_0 = 2,07 \text{ сек.}, T = 2,075 \text{ сек.}$$

#### Литература

1. Г. Н. Петров. Электрические машины. Госэнергоиздат, Ч. 1, стр. 589, 1940.
2. Hoppef. El. Rev., стр. 433, № 3695, 1948.

[15.6. 1943]



# Режимы работы и типы ветроэлектрических установок для сельских районов

Кандидат техн. наук В. Р. СЕКТОРОВ

ВИЭСХ

В последнее время выявлены новые технические возможности использования ветроэлектрических станций при совместной работе с другими электростанциями в одной электрической системе.

Советский приоритет на ветроэлектрическую станцию, работающую параллельно с мощной системой, был установлен в 1931 г. постройкой опытной установки в Крыму, работавшей с асинхронным генератором и отдававшей в общую сеть до 120 квт. 10 лет спустя в 1941 г., в США был построен агрегат, работавший по подобной же схеме с синхронным генератором, соединенным с ветряным двигателем с помощью гидромуфты. Последняя, виду ее сложности в эксплуатации для малой установки, делает такой агрегат малоперспективным для широкого распространения.

**Сравнение режимов работы ветроэлектрических станций при постоянной и переменной скорости вращения ветряного двигателя.** Одновременно с постоянным освоением работы ветряного двигателя в режиме с постоянной скоростью вращения, обычным для паровых и водяных турбин и других первичных двигателей, применяемых на электростанциях, в ветротехнике имеется также другая тенденция — приспособить схему генерирования электроэнергии к оптимальному аэродинамическому режиму ветряного двигателя, которым является режим при переменной скорости вращения и постоянном модуле быстротходности. Этот режим требует, однако, для поддержания постоянства частоты принципиально нового и более сложного типа генератора или сложной системы передачи от двигателя к генератору.

Автором предпринята попытка сравнить эффективность этих двух режимов в энергетическом отношении.

При работе ветряного двигателя с постоянной скоростью вращения (первый режим) модуль быстротходности двигателя  $z = \frac{\omega R}{v}$ , представ-

Сравнивается эффективность режимов работы ветроэлектрических станций, работающих в системе совместно с другими электростанциями, при постоянной и переменной скорости вращения ветряного двигателя. Данна методика оценки возможной доли участия ветроустановок в энергоснабжении сельских районов, исходя из перспективных энергобалансов районов и технических условий эксплуатации ветроустановок.

ляющий отношение окружной скорости конца лопасти  $\omega R$  к скорости ветра  $v$ , при малых скоростях ветра повышается, а коэффициент использования энергии ветра  $\xi$  падает (рис. 1, правая часть

кривых), отчего малые скорости ветра используются с плохими  $\xi$ .

При переменной скорости вращения (второй режим) и соответствующем идеальном подборе характеристики генератора (рис. 2) двигатель может работать на постоянном модуле  $z$  и максимальном  $\xi$  при всех рабочих скоростях ветра, вследствие чего при работе на сеть большой мощности получается прирост годовой выработки.

Для двигателей с поворотными лопастями возможен также улучшенный режим работы при постоянном числе оборотов с переменной начальной установкой аэродинамического регулирования, соответствующей изменению угла лопастей к относительному потоку ветра. Этот режим требует автоматизации изменения этого угла в зависимости от скорости ветра. У двигателей, регулирующихся с помощью стабилизаторов, он характеризуется изменением величины  $a$  уста-

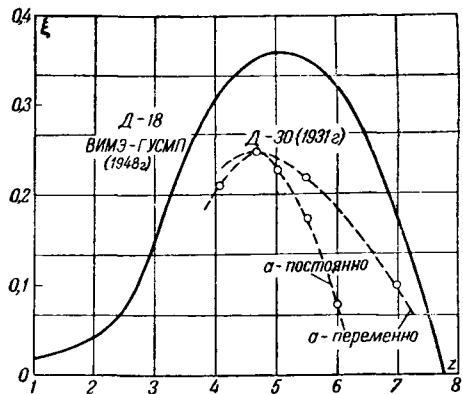


Рис. 1. Характеристики ветряных двигателей.  
— величина, характеризующая установку аэродинамического регулирования двигателя.

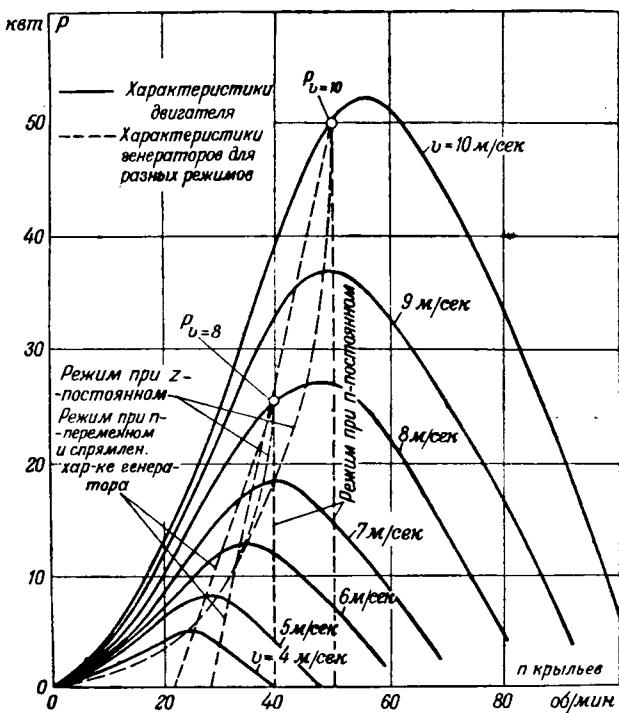


Рис. 2. Характеристики агрегата Д-18 при разных режимах работы.

$P_v = 10$  и  $P_v = 8$  — установленные мощности агрегата при соответствующих расчетных  $v$ .

новки аэродинамического регулирования крыльев, соответствующей изменению угла между хордами поперечных сечений лопасти и стабилизатора. При этом режиме (рис. 1 кривая для Д-30 при  $a$  — переменном) малые скорости ветра используются при более высоких  $v$ , чем при первом, основном, режиме.

Известен ряд схем, осуществляющих второй режим работы агрегата как-то: схема с двигателем, работающим с синхронным генератором через промежуточную гидравлическую передачу, состоящую из насоса и гидротурбины; схемы преобразования частоты, состоящие из нескольких электрических машин, схемы с генерированием постоянного тока и преобразованием его в переменный и др. Все они относительно сложны, особенно для установок небольшой мощности, и им свойственен значительно более низкий к. п. д., чем схеме с синхронным генератором, непосредственно соединенным с ветряным двигателем. Уменьшение к. п. д., которое оказывается при всех нагрузках, может снизить или даже вовсе обесценить эффект, получаемый при этом режиме от улучшения  $v$  двигателя на малых скоростях ветра.

Число часов в году, приходящееся на малые скорости ветра, и соответствующая доля годовой выработки ветроэлектрических станций по ветру, в силу существующих законов годового распределения этих скоростей, зависит от величины среднегодовой скорости ветра, увеличиваясь с ее уменьшением. Вследствие этого прирост выработки, возможный при втором или улучшенном первом режимах работы ветроэлектрических

станций, будет зависеть от ветровых условий района, в котором работает установка, т. е. от величины среднегодовой нормы<sup>1</sup> скорости ветра  $v_{cp}$ .

Сравнение режимов работы ветроэлектрических станций по выработке произведено для диапазона средне-многолетних скоростей ветра от 4 до 8 м/сек, что охватывает большую часть встречающихся на практике ветровых условий. Для всех подсчетов автором приняты следующие положения:

1. Расчетные характеристики быстроходного ветряного двигателя типа Д-18 ВИМЭ-ГУСМП с регулированием поворотом конца лопасти при помощи стабилизатора. Этот двигатель, выпущенный в последнее время опытной серией, является в настоящее время наиболее подходящим из имеющихся по типу и мощности для электрификации сельскохозяйственных районов. Результаты подсчетов, выполненных на основе его характеристик, приложимы как для двигателей того же типа с другим диаметром крыльев, так и для других типов двигателей, имеющих сходные аэродинамические характеристики крыльев.

2. Расчетные скорости ветра, соответствующие установленные мощности агрегата и число оборотов в минуту крыльев — оптимальные для данной скорости ветра  $v_{cp}$  по максимуму годовой выработки. Оптимальное число оборотов в минуту лимитируется предельной окружной скоростью на концах крыльев, принятой в 45 м/сек.

3. Значение к. п. д.  $\eta_2$  для второго режима работы задавалось в трех вариантах: а)  $\eta_2$  равен соответствующему к. п. д. синхронного генератора ( $\eta_2 = \eta_c$ ); б)  $\eta_2$  ниже его на 0,05; в)  $\eta_2$  ниже на 0,10. Условно принято, что зависимость  $\eta_2$  от нагрузки та же, что и для  $\eta_c$ .

4. Распределение скоростей ветра по Гуллену-Емцову.

Результаты подсчетов даны в виде кривых на рис. 3. Прирост выработки взят по отношению к первому режиму. По кривым видно, что более высокого эффекта от использования малых скоростей ветра можно достичь в районах с малыми среднегодовыми скоростями ветра. При работе с переменной скоростью вращения на постоянном модуле и  $\eta_2 = \eta_c$  (кривая 1) максимальный прирост выработки в диапазоне средних скоростей  $v_{cp}$  от 4 до 8 м/сек может составлять от 25 до 3%. В районах со средними скоростями ветра  $v_{cp} = 5,5 - 6 \text{ м/сек}$ , в которых ветроэлектрические станции могут иметь наибольшее распространение, прирост выработки может составлять до 10%. При  $\eta_2$ , пониженном на 0,05, прирост выработки возможен только при  $v_{cp} = 5,5 \text{ м/сек}$ , а при больших средних скоростях ветра он целиком компенсируется уменьшением  $\eta_2$ . При понижении  $\eta_2$  на 0,10 небольшой прирост выработки будет иметь место лишь в рай-

<sup>1</sup> Средняя скорость  $v'_{cp}$  на высоте центра ветроколеса 20—30 м в условиях равнинной местности будет на 20—30%, больше чем по данным метеорологической сети.

нах с малыми скоростями ветра порядка  $v_{cp} = 4 \text{ м/сек}$ , в которых ветроэлектрические станции будут строиться весьма редко.

В случае применения ветряных двигателей другими типами крыльев, отличающимися от принятых нами за нормальные, эффект увеличения выработки на втором режиме работы ветроэлектрических станций будет зависеть также от аэродинамического качества и формы аэродинамической характеристики крыльев. Чем хуже качество крыльев и круче падение характеристики правой части на больших модулях (рис. 1), тем более выгодна работа при переменной скорости и постоянном  $\xi = \xi_{\max}$ . Например, для крыльев старого типа агрегата Д-30 (1931 г.), имеющих  $\xi_{\max} = 0,24$  при крутой характеристике [Л. 2], кривая 6 прироста выработки при переменном числе оборотов будет лежать значительно выше кривой 1 для агрегата Д-18 с нормальными параметрами крыльев.

В случае, если применение синхронного генератора вызовет необходимость изменения нормальных аэродинамических характеристик ветряного двигателя, которое возможно повлияет на величину годовой выработки ветроэлектрической станции в сторону ее некоторого снижения, прелы выгодности применения второго режима работы несколько расширятся, но все же в интересующем нас диапазоне сравнительно высоких средних скоростей ветра с учетом вынужденного снижения  $\eta$ , его характеристики не будут оптимальными.

Для определения прироста выработки при улучшенном первом режиме работы требуется наличие соответствующих опытных характеристик двигателя Д-18, которые пока отсутствуют. Кривая 5 построена для этого режима приближенно на основании сравнения с кривыми 6 и 7, относящимися к двигателю Д-30 прежней конструкции. Прирост выработки в этом режиме при  $v'_{cp} = 5 \text{ м/сек}$  может составить только около 5%, однако, в случае возможности применения несложного устройства для автоматического изменения начальной установки аэродинамического регулирования двигателя, использование этого режима для двигателей с поворотными лопастями может быть целесообразным, несмотря на небольшую величину получаемого прироста выработки.

Рентабельность применения того или другого из рассмотренных режимов работы ветроэлектрических станций окончательно определяется экономическим подсчетом, учитывающим как величину выработки электроэнергии при конкретной величине  $\eta$ , так и степень надежности оборудования в эксплуатации и его стоимость.

Применение специального генератора для работы с ветряным двигателем при переменной скорости вращения может стать весьма выгодным, если его возможно будет использовать с ветряным двигателем упрощенного типа, с жестко закрепленными лопастями без аэродинамиче-

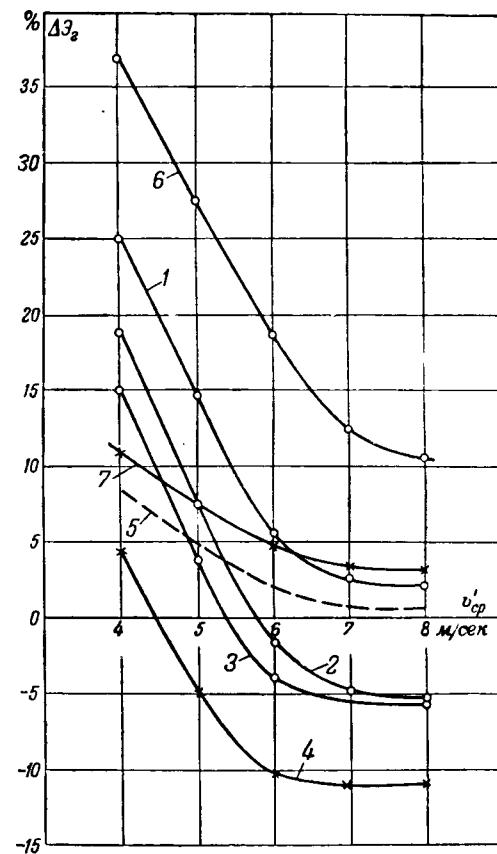


Рис. 3. Кривые прироста выработки в зависимости от среднегодовой скорости ветра (по отношению к режиму агрегата Д-18 при  $n$  и  $a$  — постоянных).

Д-18 ( $\xi = 0,36$ ): 1 —  $n$  — плавное; 2 — постоянно,  $\tau_\theta = \tau_c$ ; 2 —  $n$  — переменно; сплошная характеристика,  $\tau_\theta = \tau_c$ ; 3 —  $n$  — переменно,  $z$  — постоянно,  $\tau_\theta = \tau_c - 5\%$ ; 4 —  $n$  — переменно,  $z$  — постоянно,  $\tau_\theta = \tau_c - 10\%$ ; 5 — постоянно,  $a$  — переменно (по сравнению с кривыми 7). Д-30 ( $\xi = 0,24$ ): 6 —  $n$  — переменно,  $z$  — постоянно,  $\tau_\theta = \tau_c$ ; 7 — постоянно,  $a$  — переменно.

ского регулирования, который бы не перегружался при больших скоростях ветра. Одна из возможных конструкций такого генератора мыслится близкой по типу к коллекторному генератору, работающему с преобразованием частоты, предложенному проф. М. П. Костенко для работы с гидротурбиной [Л. 3]. Использование этой возможности может привести к значительному облегчению, упрощению и удешевлению двигателя, вес и стоимость которого имеют решающее значение для экономики всего агрегата в целом. Диапазон скоростей вращения такого генератора, возможно, целесообразно будет расширить за счет малых скоростей ветра.

Участие ветроустановок в электроснабжении сельскохозяйственных районов. Второй задачей настоящей статьи является попытка перспективно оценить долю участия ветроэнергетических установок в энергоснабжении сельскохозяйственных районов.

Подсчеты потенциальных ресурсов энергии ветра с 1 км<sup>2</sup> территории, определяемых по средним скоростям ветра, дают огромные величины. Например, при  $v_{cp} = 5 \text{ м/сек}$  среднегодовая мощность на 1 км<sup>2</sup> получается равной около 120 квт против энергоемкости сельского хозяйства, измеряемой единицами киловатт. В силу специфических особенностей энергии ветра, заключающихся в

ее рассеянности и непостоянстве, потенциальные ресурсы ветра находятся в большом несоответствии с реальными возможностями их использования.

При оценке реальных величин возможного использования энергии ветра в сельском хозяйстве, помимо указанных основных особенностей ветровой энергии, ограничивающих возможности ее использования, необходимо учесть также следующие факторы: 1) величину энергоемкости технологического потребления районов; 2) использование для покрытия нагрузки других видов местных энергоресурсов, а также районных сетей; 3) степень совпадения графиков нагрузки с графиками отдачи ветроустановок по ветру; 4) экономическую эффективность параллельного использования ветроэлектрических станций с другими электростанциями в зависимости от ветровых условий данного района; 5) технический уровень развития ветроэлектрических станций и условия их параллельной работы с другими станциями.

Следовательно, доля возможного участия ветроустановок в энергоснабжении сельскохозяйственных районов может быть оценена при составлении перспективных энергобалансов, в которых, в первую очередь, должно предусматриваться использование местных ресурсов гидроэнергии малых рек и местного топлива. Потребление дальнепривозного топлива, в частности, нефтепродуктов, для сжигания на местных силовых установках не допустимо с точки зрения народнохозяйственной целесообразности. Использование энергии ветра в качестве дополнительного мощного источника местной энергии должно быть развито в тех дефицитных по местным энергоресурсам районах, которые обладают достаточно высокими скоростями ветра, порядка  $v_{cp} = 4,5 - 5 \text{ м/сек}$  (по данным метеорологической сети).

Как известно, в силу неравномерности отдачи ветроэлектрических станций во времени, покрытие ими графика нагрузки при параллельной работе с другими электростанциями возможно только по киловаттчасам. По установленной мощности они должны дублироваться другими электростанциями. По этой же причине полное эффективное использование ветроустановок возможно только в том случае, если часы их работы по ветру совпадают с графиком нагрузки, а суммарная установленная мощность ветроэлектрических станций не превышает минимума суточного графика нагрузки, который для сельскохозяйственной энергосистемы при некотором регулировании нагрузки можно принять в 25% от максимума.

Экономическая эффективность ветроэлектрических станций выражается в уменьшении общих эксплуатационных расходов в энергосистеме, обусловленном экономией топлива, сокращением радиусов его доставки при уменьшении потребности в нем и от возможного повышения установленной мощности и увеличения использования параллельно-работающих регулируемых гидростанций [Л. 1]. Наличие ветроэлектрических станций в системе, в которой имеются такие гидростанции, может в некоторых случаях повысить использование водотока в несколько раз.

Себестоимость ветроэнергии в районах со средней скоростью ветра порядка 4,5 м/сек, без учета удешевления энергии других станций при работе ветроэлектрических станций, будет меньше, чем энергии, получаемой от местных тепловых станций.

Использование ветроэлектрических станций в настоящее время опробовано с асинхронным генератором при параллельной работе с системой большой мощности. При работе ветроэлектрических станций с местной системой, соизмеримой с ней мощности, возникает вопрос о качестве получаемой энергии в соответствии с нормами допустимого отклонения частоты от номинала при колебаниях отдачи ветроэлектрических станций. По предварительным проработкам ВИЭСХ, исходя из условий допускаемых в сельских системах колебаний частоты в 10%, ветроэлектрические установки, работая параллельно с местной системой, могут покрывать до 30% активной нагрузки сети при работе тепловых двигателей и гидротурбин без регуляторов оборотов и от 50 до 100% при наличии регуляторов, в зависимости от качества регуляторов и инерционной постоянной системы [Л. 4].

Вопрос устойчивости работы ветроэлектрических стаций при применении синхронных генераторов находится в стадии проработки. Однако, в настоящее время, базируясь на простой электрической схеме ветроэлектрических станций с асинхронным генератором, мы можем принять, с проверкой в дальнейшем экспериментальным путем, допустимое соотношение установленных мощностей ветроэлектрических станций и местной системы за какую-то среднюю величину в указанных выше пределах, т. е. порядка 0,25. Такое значение установленной мощности ветроэлектрических станций причитается в предложении, что 25% других первичных двигателей, работающих в системе, имеют достаточно малую величину инерционной постоянной и регуляторы оборотов высокого качества, а 75% двигателей работают без регуляторов, что в условиях сельских электростанций является реальным. Взятое соотношение, кроме того, обеспечивает 100% использования энергии ветроэлектрических станций по условию совпадения графика их отдачи по ветру с графиком нагрузки.

Участие ветроэлектрических станций в покрытии нагрузки по энергии при среднем числе часов использования  $T_{вс} = 1800$  и  $T_{сист} = 2800$  выразится в  $\frac{\frac{v_{вс}}{v_{сист}}}{\frac{0,25 \cdot 1800 \cdot 100\%}{2800}} = 16\%$ . При мощности местных систем

от 100 до 1000 квт ветроэлектрические станции могут базироваться на агрегатах существующих диаметров ветроколес Д-18 и Д-30 при установленной мощности по генераторам, в зависимости от  $v_{ср}$ , от 30 до 150 км/ч.

Для повышения доли участия ветроэнергии в покрытии нагрузки некоторые производственные процессы сельского хозяйства, допускающие работу по гибкому графику (как-то: помол зерна, кормоприготовление, орошение и пр.), могущие составить в сумме около 15% стационарного потребления, целесообразно переводить на работу от ветроустановок с механическим приводом, используя для этого двигатели Д-12 и Д-18 мощностью 10–30 квт.

К сетям, питаемым от мощных районных станций существующим, так и подлежащим постройке, от которых должна питаться остальная, непокрытая местными энергосистемами сельскохозяйственная нагрузка, также должно быть присоединено в благоприятных по ветру районах некоторое число крупных ветроэлектрических агрегатов с диаметром крыльев порядка Д-50 и установленной мощностью 700–1000 квт. Суммарную мощность этих ветроэлектрических станций можно принять равной 30% от максимума сельскохозяйственной части нагрузки, исходя из величины годового минимума графика нагрузки в 50% за вычетом мощности электростанций, работающих по принудительному графику. Доля участия ветроэлектрических станций в покрытии графика нагрузки по энергии аналогично предыдущему расчету будет составлять в этом случае величину порядка 20%.

В отдельных районах с сильно развитыми местными системами участие ветроэлектрических станций в местных системах по абсолютной величине отдачи будет значительным, но в среднем по отношению ко всей потребности в энергии оно будет небольшим. Таким образом, ощущенное участие ветроустановок всех видов, в том числе и механическим приводом, в покрытии потребления сельскохозяйственных районов может составлять в среднем около 1/3 от всего их стационарного потребления.

Из всей электроэнергии, производимой ветроэлектрическими станциями, 80% должно получаться от ветроэлектрических станций, присоединенных к мощным районным сетям, что составляет 50% всей энергии, полученной из полученной от ветроустановок.

**Выводы.** 1. Режим работы ветроэлектрических станций при переменной скорости вращения и постоянном модуле ветряного двигателя имеет существенных преимуществ для увеличения выработки энергии за счет лучшего использования малых скоростей ветра перед режимом с постоянной скоростью вращения.

2. Исследовательскую работу по применению специальных видов генераторов для работы с ветряным двигателем при переменной скорости вращения целесообразно связывать с возможностью применения для ветроэлектрических станций дешевых ветряных двигателей с жесткозапрессованными лопастями без регулирования, давя при этом улучшение использования малых скоростей ветра лишь как попутную задачу.

3. Оценка возможной перспективной доли частия ветросиловых установок в покрытии нагрузок сельскохозяйственных районов может быть сделана на основании изучения энергоемкости потребления и местных энергоресурсов с учетом технических возможностей применения ветроустановок.

4. Ветроустановки должны найти применение в сельскохозяйственных районах СССР, где

имеются благоприятные ветровые условия и дефицит других местных энергоресурсов, работая как ветроэлектрические стационарные в районных и местных системах, а также в виде мелких и средних установок с механическим приводом.

#### Литература

1. В. Р. Секторов. Современное состояние проектирования и опытного строительства ветроэлектрических установок. Электричество, № 2, 1933.

2. В. Р. Секторов. Энергетические характеристики ветроэлектрических станций с асинхронным генератором, работающих на общую сеть. Диссертация, МИМЭСХ, 1947.

3. М. П. Костенко. Коллекторный генератор переменного тока с регулированием частоты, независимым от скорости вращения. Электричество, № 2, 1948.

4. А. Г. Захарин. Местная электроэнергетическая система для сельскохозяйственных районов. Диссертация, ВИЭСХ, 1948.

(19. 6. 1949).



## Работа асинхронного двигателя при несимметричных схемах и сопротивление нулевой последовательности

*Кандидат техн. наук, доц. И. М. КАМЕНЬ*

*Таганрогский институт механизации и электрификации сельского хозяйства*

При разрешении ряда вопросов, связанных с несимметричными схемами ведущий обмоток статора асинхронного двигателя, необходимо принять во внимание сопротивление нулевой последовательности двигателя. Кажем, в частности, на некоторые схемы конденсаторных двигателей [Л. 2], схему «открытый треугольник» [Л. 3, 5], различные тормозные схемы [Л. 4] и др.

Метод симметричных составляющих применяется много лет, однако до сих пор нет устоявшегося мнения относительно величины сопротивления нулевой последовательности и его влияния на работу двигателя. В работах Вагнера и Эванса по теории симметричных составляющих [Л. 9] отмечается, что составляющая токов нулевой последовательности «в симметричной машине не дает ни врачающегося, ни пульсирующего поля».

Подавляющее большинство исследователей признает реактивность нулевой последовательности с сопротивлением рассеяния статорной обмотки [Л. 2, 4, 6], либо считают их близкими

излагается метод вычисления сопротивления нулевой последовательности асинхронного двигателя с фазным ротором в зависимости от числа пазов на полюс-фазу и укорочения шага обмотки. Показано, что сопротивление нулевой последовательности может значительно превышать сопротивление рассеяния статора. Доказывается, что токи нулевой последовательности создают значительный врачающий момент в двигателях с короткозамкнутым ротором. Результаты исследования могут найти применение при анализе несимметричных схем.

по величине. Другие считают возможным пренебречь сопротивлением нулевой последовательности по сравнению с другими сопротивлениями [Л. 2, 3, 4].

Предположение, что токи нулевой последовательности создают в двигателе только поля рассеяния, естественно, приводит к заключению, что поле токов нулевой последовательности не индуцирует токов в обмотке ротора и, следовательно, не может создать врачающего момента [Л. 1, 2, 3].

Ниже будет показано, что представления о тождественности сопротивления нулевой последовательности с сопротивлением рассеяния статора и об отсутствии влияния соответствующего поля на ротор не подтверждаются в действительности, и в случае асинхронных двигателей, имеющих малый воздушный зазор, приводят к значительным ошибкам.

На рис. 1,а показаны направления токов в пазах однослойной трехфазной обмотки, имеющей  $p = 1$  и  $q = 3$ , соединенной по схеме рис. 1,б, т. е. обтекаемой токами нулевой последователь-

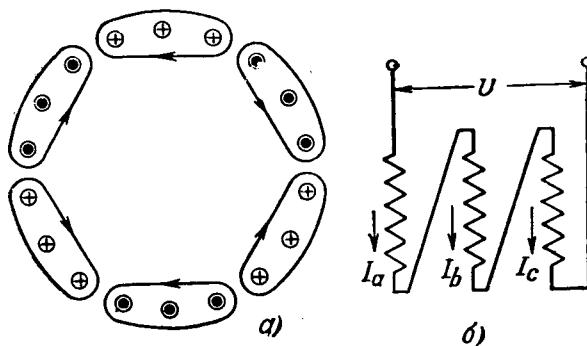


Рис. 1.

ности. В результате, как видно из рисунка, в воздушном зазоре создается пульсирующее магнитное поле, имеющее 3 пары полюсов и представляющее, следовательно, третью пространственную гармонику поля. Силовые линии этого поля сцепляются с обмоткой ротора и индуцируют в ней э. д. с. В обмотках фазного ротора, соединенного звездой, индуцируемые э. д. с. нулевой последовательности равны и совпадают по фазе, и токи нулевой последовательности в роторе отсутствуют. При соединении обмотки ротора треугольником или в обмотке «беличья клетка» появляются токи нулевой последовательности, которые взаимодействуют с соответствующим полем статора и могут создавать значительный врачающий момент. Величина сопротивления нулевой последовательности двигателя в этом случае зависит от скольжения.

В основе цитированного выше положения [Л. 9] лежит общераспространенное допущение о синусоидальном распределении м. д. с., создаваемой током в обмотке одной фазы. Но в данном случае при соединении по схеме рис. 1, б основная синусоида исчезает. Поэтому нельзя пренебречь третьей гармоникой поля, которая теперь играет доминирующую роль. Поток рассеяния статора, имеющего обмотку с неукороченным шагом, составляет лишь часть потока нулевой последовательности.

**Определение сопротивления нулевой последовательности.** Примем обозначения:  $r_1$  — активное сопротивление;  $L$  — индуктивность одной фазы статора;  $M$  — взаимоиндуктивность двух обмоток статора, принадлежащих разным фазам;  $U_a$ ,  $U_b$ ,  $U_c$  — фазовые напряжения на зажимах обмоток;  $U_{a2}$ ,  $U_{b2}$ ,  $U_{c2}$  — линейные напряжения питающей сети;  $Z_0$  — сопротивление нулевой последовательности.

Если питать переменным током обмотку только фазы  $a$ , то в обмотках  $b$  и  $c$  будут индуцироваться э. д. с.

$$E_x = j\omega M I_a$$

имеющие направление, противоположное э. д. с. самоиндукции в обмотке  $a$ . Рассмотрение конфигурации силовых линий приводит к заключению, что число потокосцеплений обмоток  $b$  —  $u$  или  $c$  —  $z$  меньше половины числа потокосцеплений обмотки  $a$  —  $x$ , т. е., что  $M < 0,5 L$ .

Для симметричной трехфазной обмотки, соединенной звездой или треугольником, имеем место равенства:

$$U_a = i_a r_1 + j\omega L I_a - j\omega M I_b - j\omega M I_c, \quad (1)$$

$$I_a + I_b + I_c = 0, \quad (2)$$

откуда получаем:

$$\dot{U}_a = i_a [r_1 + j\omega(L + M)] = i_a Z_m. \quad (3)$$

Аналогичные выражения получаются для других фаз.

Величина  $r_1 + j\omega(L + M) = Z_m$  представляет сопротивление холостого хода эквивалентной схемы.

Для схемы рис. 1, б

$$I_a = I_b = I_c = I_0; \dot{U} = 3i_0 Z_0 = \dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c.$$

С другой стороны, из равенства (1) при этих условиях получаем:

$$\dot{U} = \dot{U}_b = \dot{U}_c = i_a [r_1 + j\omega(L - 2M)],$$

откуда следует:

$$r_1 + j\omega(L - 2M) = Z_0 = r_1 + jX_0. \quad (4)$$

Обозначая через  $k = \frac{M}{L}$  коэффициент связи

двух обмоток статора, получим соотношение реактивностей:

$$\frac{X_0}{X_m} = \frac{1 - 2k}{1 + k}.$$

**Определение коэффициента связи  $k$ .** Обмотка с неукороченным шагом. Рассмотрим однослойную трехфазную обмотку, имеющую  $p = 1$ ,  $q = 5$  (рис. 2). Предположим, что провод одной фазы  $a$  —  $x$  обтекаются током  $I$ . Распределение силовых линий показано на рисунке пунктиром.

Определим потокосцепление  $\Phi_L$  обмотки  $a$  —  $x$ . Обозначим:  $w_s$  — число проводников в секции (пазу);  $l$  — длина якоря, см;  $t$  — зубцовое деление, см;  $\tau$  — полюсное деление, см;  $B_n$  — индукция, создаваемая в зазоре амперпроводами одной секции;  $\delta$  — приведенная длина воздушного зазора с учетом магнитного сопротивления стали;  $\varphi$  — поток, создаваемый в одном зубцовом делении амперпроводами одной секции.

Тогда

$$B_n = \frac{Iw_s}{1,6\delta}; \quad \varphi = B_n lt = \frac{Iw_s lt}{1,6\delta}. \quad (5)$$

Зубцы, находящиеся по одну сторону оси симметрии  $Y$  —  $Y$ , можно разбить на три зоны. В зоне  $5 \div 16$ , содержащей в общем случае  $2q + 1$  зубцовых делений, поток каждого зубца равен  $q\varphi$  и сцепляется с  $qw_s$  проводами обмотки  $a$  —  $x$ . Соответствующее число потокосцеплений

$$\Psi_L^1 = q^2 \varphi w_s (2q + 1).$$

В зонах  $3 \div 5$  и  $16 \div 18$ , содержащих каждая по  $\frac{q-1}{2}$  зубцовых делений, зубцовые потоки равны и сцепляются с разным числом проводов

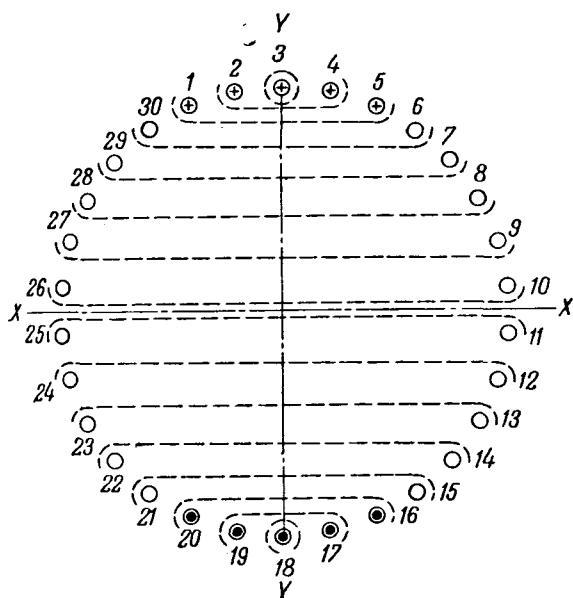


Рис. 2.

Число потокосцеплений в обеих зонах

$$\Psi_L^I = 2\varphi w_s [1^2 + 3^2 + 5^2 + \dots + (q-2)^2] = 2\varphi w_s \times \frac{q(q-1)(q-2)}{6}.$$

Общее число потокосцеплений:

$$\Psi_L = \Psi_L^I + \Psi_L^{II} = \varphi w_s \cdot \frac{7q^3 + 2q}{3}. \quad (6)$$

При  $q$  четном получается тот же результат.

Определим теперь число потокосцеплений взаимной индукции с обмоткой фазы  $c-z$  (пазы  $6 \div 10$  и  $21 \div 25$ ).

Провода паза 6 дают  $q\varphi w_s$  потокосцеплений, пазы 7–2  $q\varphi w_s$  и т. д., кроме последнего, 10-го паза, дающего  $\frac{1}{2}q \cdot q\varphi w_s$  потокосцеплений, так как только половина потока зубца  $10 \div 11$  сцепляется с проводами пазов  $6 \div 10$ . Такую же картину получаем для пазов  $21 \div 25$ .

Общее число потокосцеплений:

$$\Psi_M = 2q\varphi w_s \left\{ [1+2+3+\dots+(q-1)] + \frac{1}{2}q \right\} = \varphi w_s q^3. \quad (7)$$

Тот же результат получается при  $q$  четном. Следовательно,

$$k = \frac{M}{L} = \frac{\Psi_M}{\Psi_L} = \frac{3q^2}{7q^2 + 2}. \quad (8)$$

Действительность нулевой последовательности определяется из выражения

$$\frac{X_0}{X_m} = \frac{1 - 2k}{1 + k}. \quad (9)$$

При очень большом  $q$  получается наименьшая величина  $X_0 = 0,1 X_m$ . Следовательно, в двигателях с фазным ротором, соединенным звездой, величина  $X_0$  значительно превышает реактивность рассеяния статорной обмотки и,

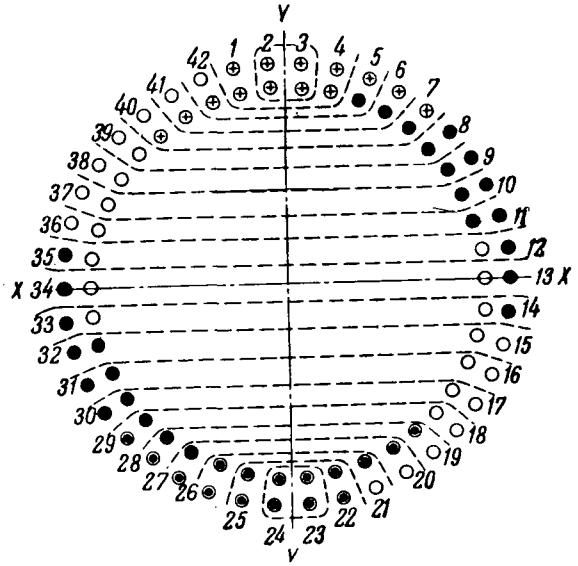


Рис. 3.

как правило, оказывается больше сопротивления обратной последовательности.

*Двухслойная симметричная обмотка с укороченным шагом.* На рис. 3 показана обмотка с  $p=1$ ,  $q=7$ ; шаг укорочен на  $\beta=3$  пазов. Ток  $I$  проходит в обмотке одной фазы  $a-x$ . Направление тока в проводах показано на рисунке. Обозначим  $\varphi$  поток зубцового деления, созданного амперпроводами одного слоя в пазу. Когда  $(q-\beta)$ —четное число, ось симметрии потока  $Y-Y'$  проходит между пазами (через зубец). Определяя число потокосцеплений тем же методом, как в предыдущем случае, получим:

$$\Psi_L = \frac{4}{3}\varphi w_s (7q^3 + 2q - 3q^2 + \beta^3 - \beta), \quad (10)$$

$$\Psi_M = \frac{2}{3}\varphi w_s (6q^3 - \beta^3 + \beta). \quad (11)$$

При укорочении шага на одну треть полюсного деления, когда  $\beta=q$

$$\frac{M}{L} = 0,5; \quad X_0 = 0.$$

Определение  $k$  для обмоток с дробным  $q$  в настоящей статье не приводится. Формальное применение формул (8), (10), (11) при дробном  $q$  или интерполяция не дают правильных результатов.

*Влияние потоков, замыкающихся через пазы.* В формулах (9), (10), (11) приняты во внимание только потоки, замыкающиеся через воздушный зазор. Кроме них, имеются еще потоки, замыкающиеся поперек пазов (аналогично пазовым потокам рассеяния статора при симметричном включении), вследствие чего индуктивность увеличивается:

$$L' = L(1 + \alpha).$$

Для обмотки с неукоочченным шагом можно приближенно принять

$$\alpha \approx 0,63 \cdot \frac{I_m}{I_k} \quad (12)$$

При укорочении шага  $\beta < q$

$$\alpha \approx 0,63 \cdot \frac{I_m}{I_k} \left( 1 - \frac{\beta}{q} \right) \text{(см. приложение).} \quad (13)$$

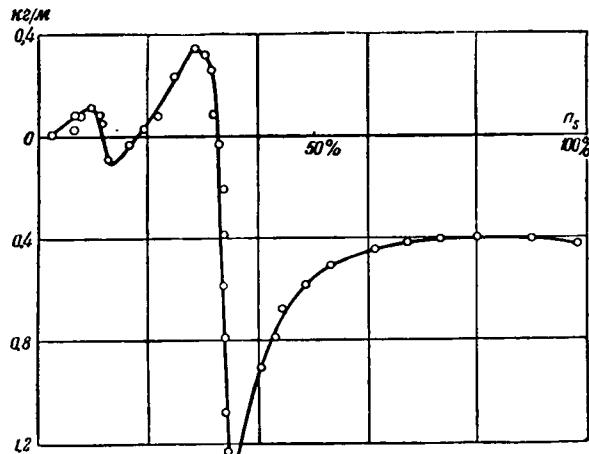


Рис. 4.

При укорочении  $\beta = q$  формула (13) не дает удовлетворительных результатов, так как при ее выводе не учтены другие потоки рассеяния.

Определение  $X_0$  при  $\beta = q$  здесь не приводится. Реактивность нулевой последовательности с учетом пазовых потокосцеплений

$$X_0 = X_m \frac{1 - 2\beta + \alpha}{1 + k + \alpha}, \quad (14)$$

где  $k$  определяется по формулам (10) и (11).

**Двигатель с короткозамкнутым ротором.** Токи нулевой последовательности образуют в воздушном зазоре пульсирующее магнитное поле с числом пар полюсов  $3p$ . Двигатель, соединенный по схеме рис. 1, б, можно, поэтому, рассматривать, как однофазный, имеющий синхронную скорость:

$$n_{s0} = \frac{1}{3} n_s = \frac{60f_1}{3p}.$$

Будучи приведен во вращение, такой двигатель должен вращаться со скоростью, несколько меньшей  $n_{s0}$ , а при скорости, большей  $n_{s0}$ , переходить на генераторный режим. Поэтому при всех несимметричных схемах обмотки статора, создающих, кроме прямого и обратного вращающихся полей, также поле нулевой последовательности, кривая моментов должна иметь провал вблизи одной трети синхронной скорости прямого поля.

Эти соображения полностью подтверждаются на опыте. На рис. 4 изображена полученная из эксперимента кривая моментов двигателя завода „Вольта“, соединенного по схеме рис. 1, б. Данные двигателя: мощность 5,8 квт; 220/380 в; 20,8/12 а; 1450 об/мин;  $\cos \varphi = 0,8$ . В статоре 35 пазов, обмотка двухслойная с укороченным шагом:  $y = 1 - 8$ ;  $\beta = 2$ ;  $q = 3$ . Ротор короткозамкнутый с засыпкой алюминием. Напряжение при опыте составляло 95 в, т. е. 32 в на фазу.

Кривая моментов меняет знак при скорости, несколько меньшей одной трети синхронной. Отрицательный максимум момента больше положительного, так как при скорости больше одной трети синхронной, оба вращающиеся поля, на которые разлагается пульсирующее, действуют против вращения. При скорости, значительно большей одной трети синхронной, отрицательный момент остается почти постоянным.

Провал в кривой моментов при скорости около 160 об/мин объясняется следующим образом. При схеме рис. 1, б из-за укорочения шага обмотки токи в секциях совпадают по направлению только в одном пазу, а в двух следующих пазах противоположны, вследствие чего кривая м. д. с. имеет прямоугольную форму. Поэтому появляются нечетные пространственные гармоники, из которых наибольшая по амплитуде — третья (по отношению к полю нулевой последовательности) имеет  $3 \cdot 3 p = 9$  пар полюсов и создает соответствующий момент при

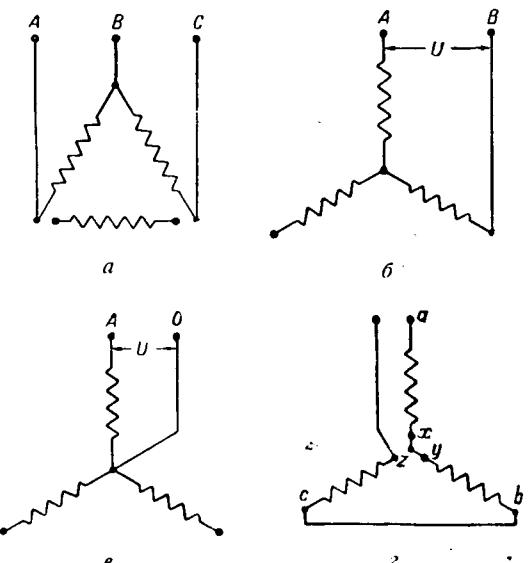


Рис. 5.

скорости  $\frac{1}{3} n_s$ . Такое же действие оказывают и другие гармоники (5-я, 7-я и т. д.), но в меньшей степени.

При соединении по схеме рис. 5, а (открытый треугольник) упомянутый двигатель разворачивается до нормальной скорости (без нагрузки), в то время как другой двигатель «Prima» (127/220 в; 2 л. с.), имеющий  $q=3$  и обмотку с неукороченным шагом, ротор короткозамкнутый с круглыми медными стержнями) «заедает» на одной трети синхронной скорости. Из предыдущего ясно, что второй двигатель имеет более сильное поле нулевой последовательности вследствие отсутствия укорочения шага.

В двигателе, соединенном по схеме с перевернутой фазой статора, влияние поля нулевой последовательности настолько велико, что заедание получается и при обмотке с укороченным шагом. Явление заедания в схеме с перевернутой фазой вследствие действия токов нулевой последовательности было рассмотрено и экспериментально подтверждено автором в 1937 г.

Необходимо отметить, что схема открытый треугольник была уже давно (в 1925 г.) весьма обстоятельно исследована в работе Е. В. Нитусова [Л. 5], где имеется указание о значительном влиянии третьей пространственной гармоники, которая, как мы видели, и является полем нулевой последовательности. Влияние этой гармоники на короткозамкнутый ротор в упомянутой работе не рассматривалось. Метод симметричных составляющих в 1925 г. еще не был в достаточной степени разработан в статье Е. В. Нитусова не использован.

Следует особо рассмотреть однофазный режим двигателя, когда включена только одна из трех фаз статора (рис. 5, б). В данном случае разложение пульсирующего поля на два вращающихся не дает правильных результатов. Так как включенная часть обмотки имеет фазную зону в  $60^\circ$ , следует схему рассматривать, как симметричную трехфазную с токами  $i_a = 0, i_b = 0, i_c = 0$ . Симметричные составляющие токов соответственно будут:

$$i_1 = i_2 = i_3 = \frac{1}{3} i_a; \quad U_a = i_1 Z_1 + i_2 Z_2 + i_3 Z_3; \quad i_a = \frac{3 U_a}{Z_1 + Z_2 + Z_3},$$

т. е. в отличие от однофазной схемы рис. 5, б имеет ток нулевой последовательности. Отсюда следует, что кривая моментов для схемы рис. 5, в имеет провал на одной трети синхронной скорости, что подтверждено экспериментально на двигателе «Вольта» (рис. 6). И здесь следует отметить дополнительный провал при одной де-

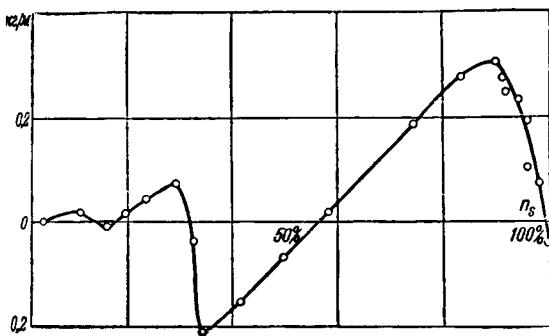


Рис. 6.

этой синхронной скорости, причина которой была объяснена выше.

Из других схем, при которых возможно явление задания, но не проверено опытом, укажем на схемы конденсаторного двигателя, в которых обмотки статораединены несимметрично.

Величина  $Z_0$  в двигателе с короткозамкнутым ротором изменяется в зависимости от скольжения и достигает максимума при скорости  $n_{s0}$ . Если разлагать пульсирующее поле нулевой последовательности на два вращающихся, как обычно принято, то легко видеть, что при скорости  $n_{s0}$  величина  $Z_0$  все же должна быть меньше, чем в случае разомкнутого ротора вследствие размагничивающего действия инверсного поля, т. е.

$$Z_0 < r_1 + j\omega(L - 2M).$$

При неподвижном роторе поток нулевой последовательности имеет примерно такую же конфигурацию, как при коротком замыкании симметричного двигателя, если шаг не укорочен. Приведенные соображения дают возможность ориентировочно оценить величину  $Z_0$  в двигателях с короткозамкнутым ротором. Для более точного определения производятся дальнейшие исследования.

Следует отметить, что разложение пульсирующего поля нулевой последовательности на два вращающихся недостаточно отражает действительность, ибо оно является справедливым только для однофазного двигателя, у которого  $\frac{2}{3}$  общего числа пазов содержат проводники с током (рис. 5, б), в то время как в схеме рис. 1, б ток проходит во всех пазах (рис. 1, а). В случае неукороченного шага и  $q$ , кратного трем, более надежные результаты должно давать разложение на три поля, соответствующее схеме рис. 5, г, при которой обтекаются током провода всех пазов. Вообще, в этом случае следует принимать во внимание кривую м. д. с. и пространственные гармоники, кратные трем, которые исчезают при симметричной трехфазной обмотке.

Изменение  $Z_0$  при вращении ротора должно иметь место в синхронных генераторах и двигателях с демпферной клеткой, а также в турбогенераторах, массивный ротор которых действует, как демпферная обмотка. Опыты Пиотровского [Л. 8] и Ломоносовой [Л. 7] косвенно подтверждают это предположение, хотя в упомянутых работах не объяснена причина изменения  $Z_0$  при вращении ротора.

При однофазном к. з. или замыкании двух фаз на нейтраль появляется дополнительное нагревание стали массивного ротора токами нулевой последовательности. Это обстоятельство до сих пор никем, повидимому, не было исследовано. Постановка соответствующих опытов является весьма желательной.

Приложение. Число пазовых потокосцеплений одной фазы двухслойной обмотки с неукороченным шагом при токе  $I$

$$\Psi_s = 2 \cdot 4 \omega_s \xi l \lambda q p I,$$

где  $\lambda$  — удельная магнитная проводимость паза.

Принимая во внимание равенства (5), (6) и учитывая, что  $\tau = 3qt$ , получим:

$$\alpha = 28,8 \cdot \frac{\lambda \delta'}{\tau} \cdot \frac{q^2}{7q^3 + 2q}. \quad (15)$$

Для вычисления  $\alpha$  нужны расчетные данные двигателя. Но возможно приближенно определить  $\alpha$  по току холостого хода и короткого замыкания. Реактивность рассеяния одной фазы симметричной трехфазной обмотки статора

$$X_1 = \frac{4\pi f \omega_1^2 l \lambda}{pq} \cdot 10^{-8}.$$

Так как для двухслойной обмотки

$$\omega_1 = 2\omega_s pq, \text{ то } \frac{\Psi_s}{I} = \frac{X_1}{2\pi f} \cdot 10^{-8}.$$

С другой стороны:

$$\omega(L + M) = X_m; X_1 \approx \frac{1}{2} X_\kappa = \frac{1}{2} z_\kappa \sin \varphi_\kappa,$$

где  $X_\kappa$  — реактивность короткого замыкания.

Принимая в среднем:  $M = 0,45L$ ;  $\cos \varphi = 0,5$ ;  $\sin \varphi_\kappa = 0,87$ , получим:

$$\alpha = \frac{\Psi_s}{p \Psi_L} \approx 0,63 \cdot \frac{X_\kappa}{X_m} = 0,63 \cdot \frac{I_m}{I_\kappa}. \quad (16)$$

Так как  $\frac{I_\kappa}{I_m} = 10 \div 20$ , то  $\alpha \approx 0,032 \div 0,063$ .

В двухслойной обмотке с укороченным шагом  $2\frac{2}{3}$  пазов содержат лишь по одной секции фазы  $a - x$ , вследствие чего увеличивается одновременно  $L$  и  $M$ . Поэтому будем принимать во внимание только пазовые потокосцепления ( $q - \beta$ ) пазов, содержащих по две секции фазы  $a - x$ . Тогда

$$\alpha \approx 0,63 \cdot \frac{I_m}{I_\kappa} \cdot \left(1 - \frac{\beta}{q}\right). \quad (17)$$

### Литература

- Г. М. Махарадзе. Ошибки в стабильных учебниках по электрическим машинам. Электричество, стр. 58, № 6, 1939.
- Г. Б. Меркин. Теория и расчет конденсаторных двигателей. Труды ЛИИ, № 5, 1947.
- А. Я. Бергер и др. Асинхронный двигатель в анонимальных режимах. ВЭГА, стр. 195, 1933.
- Г. Б. Меркин. Работа асинхронного двигателя при несимметрии в статоре. Электричество, № 11, 1940.
- Е. В. Нитусов. Работа асинхронного двигателя при соединении статора открытым треугольником. Известия ГЭИ, вып. 8, 1921.
- А. Я. Бергер, В. И. Сысоев и В. А. Васильев. Основные элементы новейшей теории синхронной машины. ОНТИ, 1935.
- Л. А. Ломоносова и Е. А. Паль. Опытное определение индуктивного сопротивления нулевой последовательности трехфазной синхронной машины. Труды ЛИИ, № 2, 1938.
- Л. М. Пиотровский. Испытание синхронных машин. ОНТИ, стр. 174, 1937.
- К. Ф. Вагнер и Р. Д. Эванс. Метод симметричных составляющих. ОНТИ, 1935.

[18. 6. 1948]



# Проектирование пусковой диаграммы

Доктор техн. наук, проф. Р. Л. АРОНОВ

Харьковский электротехнический институт

Общий анализ пусковой диаграммы машины постоянного тока при неизменном напряжении сети и превалирующем активном сопротивлении в цепи якоря ( $L_a = 0$ ) требует выбора  $4n + 5$  переменных, приведенных в таблице (рис. 1), где  $n$  — число пусковых ступеней сопротивлений.

Для часто пускаемых электроприводов время пуска и торможения существенно влияют на производительность, а дополнительные потери при процессах управления значительны и могут привести к увеличению потребного габарита электродвигателя. Пусковой момент ограничен рядом требований. Оценка всех условий возможна лишь при проектировании конкретной установки. Предпринята попытка установить исходные соотношения, позволяющие правильно выбрать элементы пусковой диаграммы.

Величины	Обозначения	число переменных
Пиковые токи . . . . .	$I_1 I_3 I_5 \dots I_{2n-1} I_{2n+1}$	$n+1$
Точки переключений . . .	$I_2 I_4 I_6 \dots I_{2n}$	$n$
Скорости при переключении . . . . .	$\omega_1 \omega_2 \omega_3 \dots \omega_n$	$n$
Сопротивление цепи . . .	$R_1 R_2 R_3 \dots R_n R_{n+1}$	$n+1$
Начальная скорость . . .	$\omega_0$	1
Конечная скорость на естественной характеристике . . . . .	$\omega_{n+1}$	1
Ток при конечной скорости . . . . .	$I_{2n+2}$	1
Итого		$4n+5$

Из этих величин четыре известны: начальная скорость  $\omega_0$ , обычно равная нулю, невыключаемое сопротивление  $R_{n+1} = R_a$ , конечная скорость на естественной характеристике  $\omega_{n+1}$  и соответствующий ей ток  $I_{2n+2}$ .

Пусковое положение и  $n$  переключений определяют  $I + n + n = 2n + 1$  связей:

$$R_1 I_1 = U, \quad (1)$$

$$R_k I_{2k} = U - C \Phi_{2k} \omega_k, \quad (2)$$

$$R_{k+1} I_{2k+1} = U - C \Phi_{2k+1} \omega_k, \quad (3)$$

где  $\Phi$  — поток, соответствующий току  $I$ . Таким образом, независимых переменных остается  $4n + 5 - 4 - (2n + 1) = 2n$ . В качестве таковых выберем  $\omega_1, \omega_2 \dots \omega_n; R_1, R_2 \dots R_n$ .

При автоматическом управлении следует ожидать небольших значений  $n$ . Поэтому число уравнений и объем расчетов приемлем для инженерной практики. Однако, для аппаратов масового применения такие расчеты нецелесообразны,

так как, помимо громоздкости при больших  $n$ , их использованию препятствует отсутствие точных данных для приведенных моментов инерции системы и моментов сопротивлений и известная неопределенность выдержки времени на ступенях.

Пиковый ток ограничен, как указано вначале. Для получения минимальных времен оперирования следует выбрать наибольшую допустимую величину. Неодинаковость пиковых токов привела бы к затруднениям с настройкой максимальной защиты, поэтому:

$$I_1 = I_3 = I_5 = \dots = I_{2n-1} = I_{2n+1} \quad (4)$$

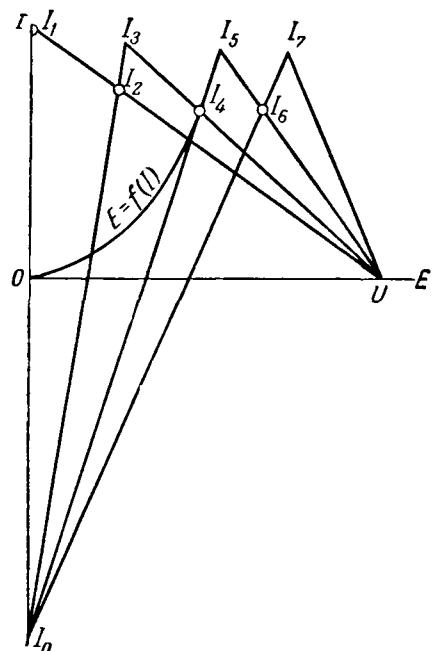


Рис. 1.

определяет  $n$  связей и оставляет свободным выбор  $n$  независимых переменных, в качестве которых удобно принять скорости при переключении  $\omega_k$ . Выбор этих величин может быть основан на минимуме потерь или затраченного времени при пуске. Ускорение от  $\omega_n$  до  $\omega_{n+1}$  можно не учитывать, так как процессы после выхода на естественную характеристику уже не зависят от способа пуска.

Примем участок кривой намагничивания машины между  $I_1$  и  $I_{2k}$  прямолинейным, а отрезок, отсекаемый этой прямой на оси абсцисс, равным  $J_0$ . В таком случае:

$$\Phi = \Phi_0 \left( 1 + \frac{I}{I_0} \right). \quad (5)$$

Введем следующие обозначения: относительная скорость  $v = n$ ;  $n_{20} = \omega / \omega_{20}$ ; относительный ток  $i = I / I_n$ ; потери на независимое возбуждение —  $q_\phi$ ; электрические —  $q_e i^2$ ; в щетках —  $q_u i$ ; на гистерезис —  $q_z \left( I + \frac{i}{I_0} \right)^2$ ; на вихревые токи —  $q_\psi \left( I + \frac{i}{I_0} \right)^2 v^2$ ; на трение —  $q_m v$  и потери на вентиляцию  $q_s v^3$  (или  $q_s v^2$ ).

Исходные коэффициенты здесь определены для  $\Phi = \Phi_0$  и соответствующей этому потоку граничной скорости и отнесены к единице времени.

Потери при разгоне на  $k$ -той ступени определяются, как

$$Q_k = \int_0^{t_k} F(v, i) dt. \quad (6)$$

Основное уравнение динамики напишется:

$$M_\theta - M_c = -C \Phi_0 \left( 1 + \frac{I}{I_0} \right) I - C \Phi_0 \left( 1 + \frac{I_{zp}}{I_0} \right) I_{zp} = J \frac{d\omega}{dt} \quad (7)$$

позволит выразить  $dt$  через  $dv$ . После подстановки в (6), получим:

$$Q_k = T_0 \int_{v_{k-1}}^{v_k} \frac{f_0(v) + f_1(v) \cdot i + f_2(v) \cdot i^2}{i + I_{zp} + I_0} \cdot \frac{I_0 dv}{i - I_{zp}}, \quad (8)$$

де

$$f_0(v) = q_0 + v_z q + q_m v + q_\phi v^2 + q_s v^3, \quad (9)$$

$$f_1(v) = q_u + 2 \frac{q_z v + q_\phi v^2}{I_0}, \quad (10)$$

$$f_2(v) = q_\delta + \frac{q_z v + q_\phi v^2}{I_0^2}, \quad (11)$$

$$T_0 = \frac{J R_n}{C^2 \Phi_0^2}. \quad (12)$$

Предел  $v_k$  дважды войдет в  $Q = \sum_{k=1}^n Q_k$ : как верхний — для  $k$ -той ступени и нижний для  $(k+1)$ -ой ступени. Поэтому:

$$\frac{I}{T_0} \cdot \frac{\partial Q}{\partial v_k} = 0 = \frac{f_0(v) + f_1(v_k) \cdot i_{2k} + f_2(v_k) \cdot i_{2k}^2}{(i_{2k} + I_{zp} + I_0) \cdot (i_{2k} - I_{zp})} - \frac{f_0(v_k) + f_1(v_k) \cdot i_{2k+1} + f_2(v_k) \cdot i_{2k+1}^2}{(i_{2k+1} + I_{zp} + I_0) \cdot (i_{2k+1} - I_{zp})}. \quad (13)$$

Путем прибавления и вычитания к каждому из числителей  $f_1(v_k) \cdot i_{zp} + f_2(v_k) \cdot i_{zp}^2$  и сокращений (13) легко преобразовать к виду:

$$\frac{f_0(v_k) + f_1(v_k) \cdot i_{zp} + f_2(v_k) \cdot i_{zp}^2}{i_0 f_2(v_k) - f_1(v_k)} = \frac{(i_{2k+1} - I_{zp})(i_{2k} - I_{zp})}{i_0 + i_{2k+1} + i_{2k}}, \quad (14)$$

и таким образом установить недоставшие  $n$  связей.

При независимом возбуждении (14) значительно упрощается:

$$\frac{f_0(v_k) + q_u i_{zp} + q_\delta i_{zp}^2}{q_\delta} = \frac{q_{zp}}{R_n I_n^2} = (i_{2k+1} - I_{zp}) \cdot (i_{2k} - I_{zp}). \quad (15)$$

В (14) и (15)  $I_{zp}$  может быть функцией скорости и выбрано по  $v_k$ . В случае отказа от условия (4) необходимо найти также производные от  $Q$  по  $R_k$ .  $R_k$  входит всего в один член ряда  $Q_k$ , но выражение токов через сопротивления, дифференцирование по одной переменной и интегрирование по второй приводят к громоздким трансцендентным уравнениям, не оправданным необходимостью.

При  $n=2$  подлежат определению девять переменных:  $i_1; i_2; i_3; i_4; i_5; v_1; v_2; r_1; r_2$  ( $r=R:R_n$ ). Их связывают девять уравнений:

$$r_1 i_1 = 1, \quad (16)$$

$$i_5 = i_1, \quad (17)$$

$$i_3 = i_1, \quad (18)$$

$$1 - r_1 i_2 = \left( 1 + \frac{i_2}{I_0} \right) v_1, \quad (19)$$

$$1 - r_2 i_3 = \left( 1 + \frac{i_3}{I_0} \right) v_1, \quad (20)$$

$$1 - r_2 i_4 = \left( 1 + \frac{i_4}{I_0} \right) v_2, \quad (21)$$

$$1 - r_n i_5 = \left( 1 + \frac{i_5}{I_0} \right) v_2, \quad (22)$$

$$y_1 \frac{1}{i_3} \cdot \frac{1}{i_2} + z_1 \left( \frac{1}{i_3} + \frac{1}{i_2} \right) = 1, \quad (23)$$

$$y_2 \frac{1}{i_5} \cdot \frac{1}{i_4} + z_2 \left( \frac{1}{i_5} + \frac{1}{i_4} \right) = 1. \quad (24)$$

Уравнения (23) и (24) получаются путем несложного преобразования (14) и замены функций от  $v$  одной переменной:

$$v_k = \frac{i_0 f_0(v_k) + i_{zp}(i_{zp} + i_0) f_1(v_k)}{i_0 f_2(v_k) - f_1(v_k)}, \quad (25)$$

$$z_k = \frac{f_0(v_k) + i_{zp}(i_{zp} + i_0) f_2(v_k)}{i_0 f_2(v_k) - f_1(v_k)}. \quad (26)$$

В соответствии с (25) и (26)

$$\frac{y_k}{i_0} - z_k = -\frac{i_{zp} + i_0}{i_0} i_{zp}. \quad (27)$$

Систему уравнений (16)–(24) можно решить следующим образом: из (16)  $\div$  (22) определяем токи, как функции скоростей. Подстановка этих значений в (25) и (26) определяет две связи  $v_1$  и  $v_2$ . Пересечение кривых, изображающих эти функции, определит искомое решение.

Для удобства вычислений первую кривую выгодно задать в параметрической форме:

$$v_1 \frac{1}{i_1^2} + \left( 2z_1 - \frac{i_{zp} + i_0}{i_0} i_{zp} \cdot v_1 \right) \frac{1}{i_1} + z_1 \frac{v_1}{i_0} + v_1 - 1 = 0, \quad (28)$$

$$v_2 = \frac{\frac{1}{i_1} - r_x}{\frac{1}{i_1} + \frac{1}{i_0}}. \quad (29)$$

Для каждой точки по выбранному  $v_1$  из (28) легко определить  $\frac{1}{i_1}$  после подстановки чисел и далее по (29) найти соответствующее  $v_2$ .

Уравнение (26) приводит к явной функции  $v_1$  от  $v_2$  и позволяет по точкам построить вторую кривую:

$$v_1 = 1 - \frac{(1 - v_2)^3}{1 + i_0 r_x} \times \frac{i_0 r_x + v_2 \cdot \frac{i_{zp} + i_0}{i_0} i_{zp}}{r_x v_2 + z_2 - \frac{i_{zp} + i_0}{i_0} i_{zp} \cdot v_2}. \quad (30)$$

Эти соотношения весьма упрощаются при независимом возбуждении.

**Пример.** Согласно опытным данным, определенным инж. А. Л. Нотовым и инж. И. А. Макаровой, машина КПДН-Зш с последовательным возбуждением 220 в, t2 а при 25% ПВ, 1130 об/мин имеет:  $n_{z0} = 1450$  об/мин,  $q_0 = 0$ ;  $q_s = 1190$ ;  $q_{us} = 124$ ;  $q_z = 244$ ;  $q_\phi = 250$ ;  $q_m = 19.9$ ;  $q_b = 224$ , причем  $q_{mech} = 19.9 v + 224 v^2$ . Все мощности выражены в ваттах.

В соответствии с этими числами:

$$f_0(v) = 226 v + 474 v^2;$$

$$f_1(v) = 124 + 2 \frac{246 v + 250 v^2}{5.14},$$

$$f_2(v) = 1190 \frac{246 v + 250 v^2}{5.44},$$

где  $i_0 = 5.44$ ;  $r_x = 0.0846$ ;  $i_0 r_x = 0.46$ ;  $i_{zp} = \text{const} = 1$ .

Пересечение кривых определяет решение системы:  $v_1 = 0.27$ ;  $v_2 = 0.45$  (рис. 2). Далее по (22) легко найти

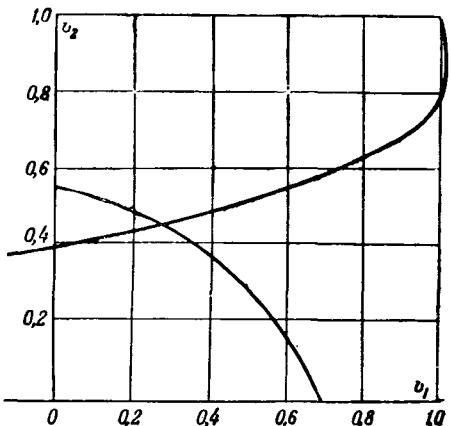


Рис. 2.

$i_5 = 3.29 = i_3 = i_1$ . Согласно (16)  $r_1 = 0.305$ ; из (20) найдем  $r_2 = 0.172 \approx 2r_x$ . Уравнения (19) и (21) дадут  $i_2 = 2.05$  и  $i_4 = 2.15$ . Эти соотношения допустимы, так как пик  $I_b$  возникает при  $\omega_2 = 0.4$ ;  $\omega_3$ , особенно это справедливо, если принять во внимание снижение пиков тока из-за индуктивности главной цепи.

При многоступенчатом пуске можно положить  $I = I_{cp} = \text{const}$ . В таком случае интегрирование (8) приведет к:

$$Q = T_0 \frac{i_0}{i + i_{zp} + i_0} \cdot \frac{1}{i - i_{zp}} \left[ \left( q_2 \frac{v_n^2}{2} + q_\phi \frac{v_n^3}{3} \right) \left( 1 + \frac{i}{i_0} \right)^2 + (q_d i^2 + q_{us} i) v_n + q_m v_n + q_m \frac{v_n^2}{2} + q_b \frac{v_n^4}{4} \right], \quad (31)$$

где  $v_n$  — конечное значение скорости.

Оптимальные условия пуска определяются путем приравнивания нулю производной от  $Q$  по  $i$ . После отбрасывания не равных нулю множителей  $T_0$  и  $v_n$  и алгебраических преобразований легко получить квадратное уравнение:

$$\left( q_3 - \frac{q_{us}}{i_0} - \frac{a}{i_0^2} \right) i^2 - 2 \left( q_3 i_{zp} + \frac{a + b + q_3 i_{zp}^2}{i_0} + \frac{ai_{zp}}{i_0^2} + \frac{ai_{zp}^2}{i_0^3} \right) i - \left( a + b + q_{us} i_{zp} + \frac{2ai_{zp} + q_{us}}{i_0} + \frac{2ai_{zp}^2}{i_0^2} \right) = 0, \quad (32)$$

где

$$a = q_2 \frac{v_n^2}{2} + q_\phi \frac{v_n^3}{3} \quad b = q_0 + q_m \frac{v_n}{2} + q_b \frac{v_n^4}{4}.$$

Свободный член отрицателен и оба корня уравнения вещественны и различны по знаку, из них применим только положительный.

При независимом возбуждении ( $i_0 = \infty$ ) формула (32) весьма упрощается и приводит к решению:

$$i = i_{zp} = \sqrt{i_{zp} + \frac{a + b + q_{us} i_{zp}}{q_3}}. \quad (33)$$

**Пример.** Машина постоянного тока с независимым возбуждением имеет следующие данные (в ваттах):  $q_0 = 1215$ ;  $q_s = 3140$ ;  $q_z v_n = 340$ ;  $q_\phi v_n^2 = 500$ ;  $q_m v_n = 250$ ;  $q_b v_n^3 = 160$ ;  $q_{us} = \Delta U \cdot I_n = 1.1 \cdot 250 = 275$ . следовательно:

$$a = \frac{340}{2} + \frac{500}{3} = 337; \quad b = 1215 + \frac{250}{2} + \frac{160}{4} = 1380;$$

$$a + b = 1717.$$

Уравнение (33) приведет к следующим решениям:

Нагрузочный ток $i_{zp}$	1	0,75	0,5	0,25
Пусковой ток $i_{zp}$	2,28	1,83	1,4	1,03

Общее относительное ( $\tau_n = t_n : T_0$ ) время пуска определяется с помощью (7), как:

$$\tau_n = \sum_{k=1}^{n+1} \int_{v_{k-1}}^{v_k} \frac{i_0 dv}{(I + i_{zp} + i_0)(i - i_{zp})} = \sum_{k=1}^{n+1} \left[ \frac{1 + r_k i_0}{2i_{zp} + i_0} \ln \frac{i_0 (1 - r_k i_{zp}) - (i_0 + i_{zp}) v_{k-1}}{(i_0 + i_{zp})^2} - \frac{i_0^2 \ln \frac{i_0 (1 + r_k i_{zp} + r_k i_0) + i_{zp} v_{k-1}}{i_0 (1 + r_k i_{zp} + r_k i_0) + i_{zp} v_k}}{i_{zp}^2} \right] - \frac{i_0}{i_0 + i_{zp}} \cdot \frac{v_{n+1}}{i_{zp}}. \quad (34)$$

При независимом возбуждении:

$$\begin{aligned} \tau_n &= \sum_{k=1}^{n+1} r_k \ln \frac{1 - r_k i_{zp} - v_{k-1}}{1 - r_k i_{zp} - v_k} = \\ &= \sum_{k=1}^{n+1} r_k \ln \frac{i_{2k-1} - i_{zp}}{i_{2k} - i_{zp}}. \end{aligned} \quad (35)$$

Дифференцирование (34) по  $v_k$  приведет к условию  $i_{2k} = i_{2k-1}$ , т. е. к прямому включению на сеть. Задача приобретет смысл только при ограничении пиков тока  $i_1 = i_3 = \dots = i_{2n-1} = i_n$ , оставляющим свободным выбор  $n-1$  переменных.

Пример. Пуск в две ступени двигателя независимого возбуждения при нагрузке, линейно возрастающей со скоростью  $i_{zp} = 0,15 + v$ . Положим  $i_n = 1,75$ ;  $r_s = 0,15$ . При этих данных согласно (35) относительное время пуска:

$$\tau_n = \sum_{k=1}^{n+1} \frac{r_k}{r_k + 1} \ln \frac{(1 + r_k) i_n - 1,15}{\frac{r_k}{r_k + 1} i_n - 1,15}. \quad (36)$$

Пусковому току  $i_n = 1,75$  соответствует  $r_1 = 0,57$ ;  $r_1$  является единственной неизвестной величиной и может быть найдено по:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tau}{\partial r_2} = 0 &= \frac{1}{(I + r_2)^2} \ln \frac{7r_2^2 + 2,4r_3}{1,05 - 3,55r_3} + \frac{r_3}{1 + r_3} \times \\ &\times \frac{14r_3 + 2,4}{7r_2^2 + 2,4r_3} + I + r_3 \cdot \frac{3,55}{1,05 - 3,55r_3} - \\ &- \frac{1}{2,75} \cdot \frac{4,18}{4,18r_3 - 1}. \end{aligned} \quad (37)$$

Решением (34) служит  $r_3 = 0,27$  (рис. 3). Обычная разбивка пусковой диаграммы с равными токами переключений дает  $\lambda = 1,95$  и  $r_3 = r_s \cdot \lambda = 0,293$ .

Подстановка этих значений в (36) для  $i_6 = 1,15$  приводит в первом случае к относительному времени 1,61, а

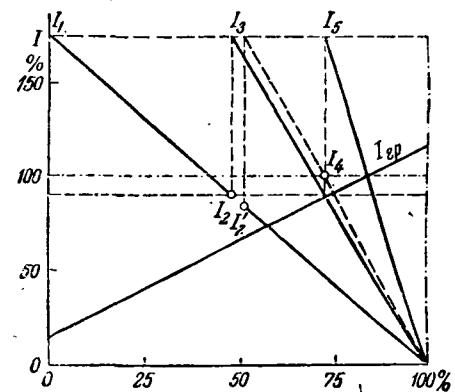
во втором к 1,98, т. е. на 23% больше. Если учитывать время пуска только до выхода на естественную характеристику, то надо вычесть из этих цифр 0,21. В таком случае обычная диаграмма дает увеличение времени на 26%.

При более интенсивном, чем указано выше, росте грузового тока требование равенства токов переключения вообще привело бы к невозможности пуска в две ступени.

Дифференцирование (35) по  $r_k$  с учетом  $r_k \cdot i_{2k} = r_{k+1} i_n i_{zp} = \text{const}$  и  $i_{zp} \cdot i_n = h < 1$  приведет к соотношению:

$$\begin{aligned} \ln \frac{1 - h}{\frac{r_{k+1}}{r_k} - h} &= \ln \left( 1 + \frac{\frac{r_{k+1}}{r_k} - h}{\frac{r_{k+1}}{r_k} - h} \right) = \\ &= \frac{\frac{r_{k+1}}{r_k}}{\frac{r_{k+1}}{r_k} - h} - \frac{1}{\frac{r_{k+1}}{r_k} - h}. \end{aligned} \quad (38)$$

Решение  $r_{k+1} = r_k = r_{k-1}$  вновь определяет безрежимный пуск, но если  $r_{k+1} : r_k$  близко к единице (многоступенчатый пуск), то  $\ln(I + x) \approx x$ , и в таком случае решением является также  $r_{k+1} : r_k = r_k : r_{k-1}$ . Таким образом, равенство токов переключения является обоснованным при постоянстве грузового момента и многоступенчатой пусковой диаграмме.



# Аналитический метод учета размагничивающего действия поперечной реакции якоря при больших перегрузках

Кандидат техн. наук Л. М. ШИЛЬДИНЕР

Москва

Задача определения кажущегося размагничивания поперечной реакции якоря электрических машин с выступающими полюсами заключается в том, чтобы найти среднее значение функции, выражающей распределение демпфируемой реакцией якоря индукции в воздушном зазоре под главными полюсами при разных нагрузках:

$$f_1(x) = \frac{\int_{x_1}^{x_2} f(x) dx}{x_2 - x_1}, \quad (1)$$

где  $x$  — приведенная величина, откладываемая по оси абсцисс.

Известные графические методы [Л. 1—3] либо графоаналитические [Л. 4, 5] не лишены существенных недостатков. Метод Арнольда [Л. 1], как известно, требует выполнения кропотливых графических построений криволинейных треугольников. Касьянов несколько модифицировал этот метод и рекомендует заменять по «глазомерной оценке» площади криволинейных треугольников равными им площадями треугольников. В [Л. 1] предложены гиперболические функции в добавлении к графическим построени-

Предложен и обоснован аналитический метод учета размагничивающего действия м. д. с. поперечной реакции якоря при больших перегрузках. Предлагаемый метод позволяет также легко учесть изменение тока возбуждения шунтовой обмотки. Рассмотрены пределы размагничивающего действия поперечной м. д. с. якоря.

ям. Метод Г. Н. Петрова [Л. 2] весьма простой и достаточно точный для небольших нагрузок, однако не может быть применен для случаев нагрузок, в несколько раз превосходящих номинальную.

Нами рекомендуется метод учета размагничивающего влияния поперечной м. д. с. реакции якоря, при больших перегрузках свободный от недостатков, отмеченных выше, когда соблюдается условие, что:

$$AW_0 - \frac{AW_a}{2} < 0, \quad (2)$$

где  $AW_0$  — м. д. с. холостого хода и  $AW_a$  — м. д. с. реакции якоря.

Переходя к обоснованию нового метода, мы также воспользуемся переходной характеристикой или характеристикой холостого хода электрической машины. По оси абсцисс характеристики холостого хода откладываем от точки  $AW_0$  вправо значение  $\frac{AW_a}{2}$  и от этой последней точки влево следует отложить отрезок  $2AW_0$  (рис. 1) или, что то же самое, отмечаем точку оси абсцисс  $\frac{AW_a}{2} - AW_0$ .

Далее, из положительной площади с основанием  $AW_0 + \frac{AW_a}{2}$  вычитаем заштрихованную площадь отрицательной ветви с основанием  $AW_0 - \frac{AW_a}{2}$  (рис. 1) и тогда получаем результирующую площадь. Она ограничена ординатами в точках абсцисс  $\frac{AW_a}{2} - AW_0$  и  $\frac{AW_a}{2} + AW_0$  и соответствующим отрезком кривой характеристики холостого хода (или переходной характе-

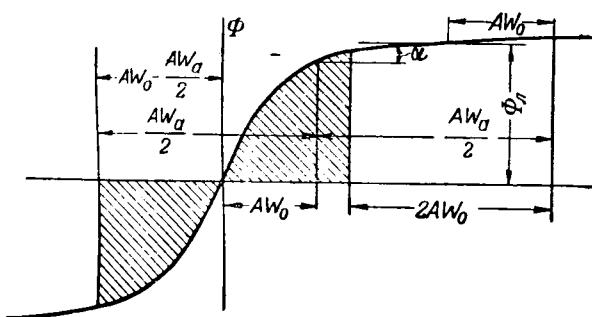


Рис. 1.

ристики). Основание результирующей площади составляет:

$$\frac{AW_a}{2} + AW_0 - \left( \frac{AW_a}{2} - AW_0 \right) = 2AW_0. \quad (3)$$

Эту площадь можно принять без ощутимой погрешности равной трапеции, и следовательно, высота результирующей площади  $\Phi_n$  находится посередине основания трапеции, т. е. в точке абсциссы  $\frac{AW_a}{2}$ . Отношение среднего значения искомой функции  $\Phi_{рез}$  (результирующего потока) к  $\Phi_n$  равно отношению основания результирующей площади  $2 \cdot AW_0$  к суммарной м. д. с. якоря:

$$\frac{\Phi_{рез}}{\Phi_n} = \frac{2AW_0}{AW_a}, \quad (4)$$

так как  $AW_a$  представляет в рассматриваемом масштабе м. д. с. идеальную ширину полюсной дуги  $b_i$ . Таким образом, результирующий поток

$$\text{при } AW_0 - \frac{AW_a}{2} < 0$$

$$\Phi_{рез} = \frac{2AW_0\Phi_n}{AW_a}, \quad (5)$$

иными словами, он изменяется по кривой, довольно близкой к равнобочкой гиперболе.

Из рис. 1 видно, что высота площади

$$\Phi_n = \Phi_0 + k \operatorname{tg} \alpha \left( \frac{AW_a}{2} - AW_0 \right) = \Phi_0 + k \operatorname{tg} \alpha \left( \frac{AW_a}{2} - AW_0 \right), \quad (6)$$

где  $k$  — коэффициент, пропорциональный проводимости;

$\alpha$  — угол наклона спрямленной части кривой характеристики холостого хода за коленом;

$k \operatorname{tg} \alpha = \lambda_0$  — проводимость;

$\Phi_0$  — поток холостого хода.

Окончательно результирующий поток (приложение)

$$\Phi_{рез} = \frac{2AW_0}{AW_a} \left[ \Phi_0 + \lambda_0 \left( \frac{AW_a}{2} - AW_0 \right) \right] = k_0 + \frac{k_1}{AS} \quad (7)$$

без учета изменения тока цепи возбуждения главных полюсов и

$$\Phi_{рез} = \frac{2(AW_0 + w_s i_s)}{AW_a} \left[ \Phi_0 + \lambda_0 \left( \frac{AW_a}{2} - AW_0 - W_s i_s \right) \right], \quad (8)$$

если учесть изменение тока возбуждения.

В формуле (8)  $w_s$  — число витков главных полюсов и  $i_s$  — приращение тока возбуждения. Вывод (8) получается, если в формуле (7) к  $AW_0$  прибавить  $w_s i_s$ , а к  $\Phi_0$  будет добавлено  $-\lambda_0 w_s i_s$ .

Формула (8) может также найти применение при изучении переходных процессов машин постоянного тока. Однако, следует все же иметь в виду, что нельзя считать окончательно решенным вопрос о возможности использования характеристик стационарного режима для изучения переходных процессов. Новых путей еще не найдено.

Таким образом, предложенное аналитическое выражение упрощает определение изменяющегося результирующего потока главных полюсов под воздействием изменяющихся реакции якоря и тока возбуждения главных полюсов для случаев, когда  $AW_0 - \frac{AW_a}{2} < 0$ .

Приведем пример пользования этим методом применительно к двигателю ПН-68, у которого  $U = 220$  в.,  $I_{a \text{ном}} = 55$  а и  $n = 2200$  об/мин.

Преобразуем уравнение (7):

$$\Phi_{рез} = \frac{2AW_0}{AW_a} \left[ \Phi_0 + \lambda_0 \left( \frac{AW_a}{2} - AW_0 \right) \right] = \frac{2AW_0}{AW_a} \times (\Phi_0 - \lambda_0 AW_0) + \lambda_0 AW_0. \quad (7)$$

Значения параметров:  $\Phi_0 = 550000$ ,  $AW_0 = 1800$ ,  $AW_a = 2250$ ,  $\operatorname{tg} \alpha = 0,2$  (рис. 2) и  $\lambda_0 = 100 \times$

$$\times \left( \lambda_0 = \frac{\text{масштаб } \Phi}{\text{масштаб } AW} \operatorname{tg} \alpha = \frac{50000}{100} \cdot 0,2 = 100 \right).$$

Первая точка, соответствующая номинальному режиму, определена по методу Г. Н. Петрова. Остальные точки кривой 2 рис. 2, получены по формуле (7).

Кружочки на кривой 2 рис. 2 получены опытным путем [Л. 7] и показывают очень хорошее совпадение с расчетом. Этот опыт также подтверждает, что можно не учитывать влияния изменения потоков дополнительных

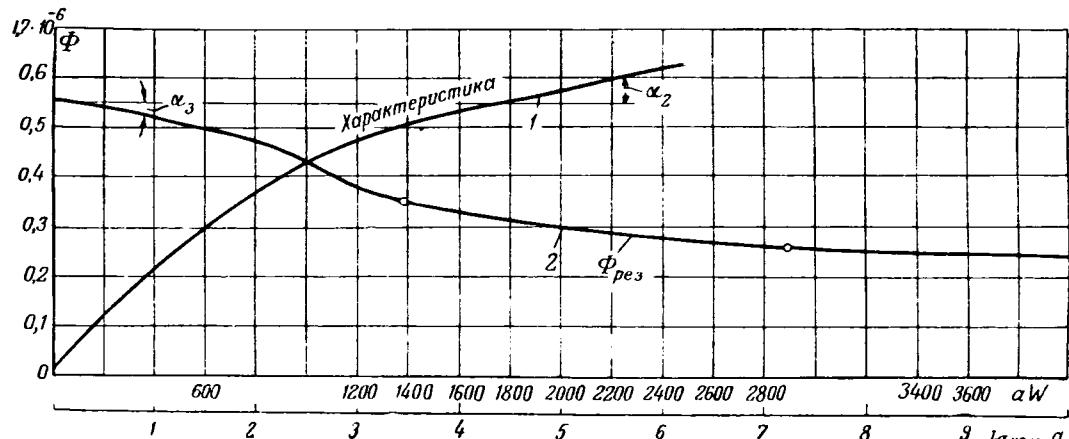


Рис. 2.

1 — характеристика холостого хода; 2 — внешняя характеристика ( $\Phi_{рез}$ )

полюсов, так как эти потоки не оказывают заметного влияния на уменьшение главного потока. В самом деле, изменение магнитного сопротивления башмаков главных полюсов, зубчатого слоя и ярма якоря, вследствие воздействия м. д. с. якоря, приходящейся на ширину полюсной дуги, увеличивает магнитное сопротивление главному потоку во много раз больше, чем составляющая м. д. с. дополнительных полюсов, которая приходится на участки ярма.

Б. Т. Касьянов рассматривает [Л. 3] также случай, когда из-за сдвига нейтрали «поток дополнительных полюсов индуцирует в ней (ветви обмотки якоря) э. д. с. обратного знака по сравнению с э. д. с. от основного потока» и отмечает, что при «небольшом полюсном делении и ослаблении главного потока эта э. д. с. может достигнуть заметной величины». По мнению автора, требуемые «ампервитки, эквивалентные реакции поперечной м. д. с. добавочных полюсов, определяются аналогично формуле (2)», т. е. по тому же принципу, как для случая реакции якоря. Автор, повидимому, не замечает различия в действующем потокосцеплении приведенных потоков реакции якоря  $\Delta\Phi_r$  и рассматриваемых при этом потоков дополнительных полюсов  $\Delta\Phi_w$ . Поэтому, если учесть отмеченную ошибку и ряд других факторов (конструкцию обмоток якоря и т. д.), то и при вращении машины можно также пренебречь влиянием потоков дополнительных полюсов.

\* \* \*

При больших перегрузках кажущееся размагничивание поперечной м. д. с. реакции якоря машин постоянного тока стремится к достаточно явно выраженному пределу. Этот предел легк, установить, если рассмотреть простейший случай, а именно: генератор постоянного тока с посторонним возбуждением без компенсационной обмотки и со щетками, находящимися на нейтрали.

Воспользуемся при рассмотрении изучаемого вопроса рекомендованными Б. А. Толвинским [Л. 6] соотношениями для построения «нормальной приведенной характеристики холостого хода», пригодными, по его утверждению, также для машин постоянного тока.

Согласно данным Б. А. Толвинского можно принять, что начальная часть приведенной нормальной характеристики холостого хода в относительных единицах выражается в таком виде:

$$y = 1,1 x. \quad (9)$$

Поэтому можно принять, что

$$\Phi_0 \approx 1,1 \cdot AW_0 \quad (10)$$

и  $\operatorname{tg} x \approx 0,2$  для диапазона изменения тока возбуждения  $1 \div 2,5$ .

Следовательно, формула (7) (в относительных единицах) будет:

$$\begin{aligned} \Phi_{res} &= \frac{2}{1,1} \Phi_0 \left( \Phi_0 + 0,1 AW_a - \frac{0,2}{1,1} \Phi_0 \right) \frac{1}{AW_a} = \\ &= \Phi_0 \left( 0,182 + \frac{1,48 \Phi_0}{AW_a} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

Если рассмотреть изменение нагрузки в достаточно большом интервале от 10- до 30-кратной номинальной величины, то колебания результирующего потока проходят в пределах

$$\Phi_{res} = (0,33 \div 0,23) \Phi_0 \quad (12)$$

(всего лишь 10%).

Этот вывод подтверждается не только в отношении малых и средних шунтовых машин от 0,5 до 30 квт, для которых автор производил проверку, но и также данными [Л. 5], относящимися к весьма мощному генератору постоянного тока (6 000 квт, 10 000 а, 600 в). В

[Л. 5] рассматривается случай к. з. между щеточными болтами, при котором компенсационная и противоположная обмотки оказываются выключенными, а противление дуги перекрытия принимается равным нулю. Автор отмечает [Л. 5], что установившийся ток, без учета реакции якоря, должен достичь 100-кратного номинального значения. В действительности вследствие влияния реакции якоря установившийся ток не превысит 28-кратного значения. Совершенно очевидно, что отчего

внутреннего падения напряжения  $\frac{28,9}{10,5}$  выражает результатирующий поток машины при установившемся к. з. т.  $\Phi_{res} = 0,29 \Phi$ .

Рассмотренное здесь физическое явление, а именно стремление к пределу размагничивающего действия поперечной м. д. с. якоря в электрических машинах, несомненно, представляет теоретический и практический интерес. В самом деле, зная лишь порядок величины номинального внутреннего падения напряжения шунтовой машины, можно без особого труда определить приближенно величину установившегося тока к. з.

Например, при 5, 2, 1% внутреннего падения напряжения, принимая среднее значение результирующего потока — 0,3  $\Phi$ , получим соответственно кратность установившегося тока (в относительных единицах)

$$\frac{0,3}{0,05} = 6; \quad \frac{0,3}{0,02} = 15; \quad \frac{0,3}{0,01} = 30.$$

Видимо, для большего значения номинального внутреннего падения напряжения следует брать верхний предел упрощенной формулы (12).

С помощью надлежащих дополнений можно подобным образом определить результирующий поток при многократных перегрузках и для других типов машин постоянного тока и также результирующий поперечный поток в синхронных машинах с выступающими полюсами.

#### Приложение.

При

$$\frac{AW_a}{2} > 2AW_0$$

$$\Phi_n = \Phi_0 + \lambda_0 \left( \frac{AW_a}{2} - AW_0 \right).$$

Отсюда

$$\Phi_{res} = \frac{2AW_0}{AW_a} \left( \Phi_0 + \frac{\lambda_0}{2} AW_a \right) = k_0 + \frac{k_1}{AS},$$

где

$$k_0 = \lambda_0 AW_0, \quad k_1 = \frac{2AW_0 \Phi_1}{b_i} \quad \text{и} \quad \Phi_1 = \Phi_0 - \lambda_0 AW_0;$$

$b_i$  — ширина полюсной дуги и  $AS$  — линейная нагрузка. С учетом изменения тока возбуждения

$$\Phi_{res} = \frac{2(AW_0 + w_s i_s)}{AW_a} \left( \Phi_0 + \frac{\lambda_0}{2} AW_a - W_s i_s \right).$$

При

$$AW_0 < \frac{AW_a}{2} < 2AW_0$$

$$\Phi_{n1} = \Phi_0 \left( \frac{AW_a}{2AW_0} - 1 \right);$$

$$\Phi_{n2} = \Phi_0 + \frac{\lambda_0}{2} AW_a; \quad \Phi_{n3} = \Phi_0 + \lambda_0 \left( \frac{AW_a}{2} - AW_0 \right);$$

$$\Phi_n = \frac{\Phi_0 \left( \frac{AW_a}{2AW_0} - 1 \right) + 4 \left[ \Phi_0 + \lambda_0 \left( \frac{AW_a}{2} - AW_0 \right) \right] + \Phi_0 + \frac{\lambda_0}{2} AW_a}{6} = \frac{2}{3} \left( \Phi_0 - \lambda_0 AW_0 \right) + \frac{AW_a}{12} \left( \frac{\Phi_0}{AW_0} + 5\lambda_0 \right);$$

$$\begin{aligned}\Phi_{рез} &= \frac{2AW_0}{AW_a} \cdot \Phi_n = \frac{4}{3} \frac{AW_0}{AW_a} \cdot \Phi_1 + \\ &+ \frac{AW_0}{6} \left( \frac{\Phi_0}{AW_0} + 5\lambda_0 \right) = m_0 + \frac{m_1}{AS}; \\ m_0 &= \frac{\Phi_0 + 5\lambda_0 AW_0}{6}; \quad m_1 = \frac{4}{3} \cdot \frac{AW_0 \cdot \Phi_1}{b_i}.\end{aligned}$$

### Литература

1. Э. Арнольд. Машины постоянного тока. Т. I, стр. 127.  
 2. Г. Н. Петров. Расчет размагничивающего действия поперечной реакции якоря машины постоянного тока. Вестник электропромышленности, стр. 15, № 10, 1944.

3. В. Т. Касьянов. Реакция машин постоянного тока. Вестник электропромышленности, стр. 9, № 2, 1940.

4. А. Weinhard. Аналитическое выражение кривой намагничивания и ее применение для быстрого определения реакции якоря. Е.и.М., стр. 283, № 27/28, 1940.

5. Н. Hess. Токи короткого замыкания и защита крупных генераторов постоянного тока. A. f. E., стр. 468, № 7, 1933.

6. Б. А. Толвинский. Универсальная приведенная характеристика генераторного холостого хода динамоэлектрических машин и ее аналитическое выражение. Электросила, стр. 11, № 2—3, 1946.

7. Л. М. Шильдинер. Экспериментальное исследование размагничивающего действия якоря. Электротехника, № 6, 1949.

[14. 7. 1948]



## К вопросу об инерционности серводвигателей постоянного тока с независимым возбуждением

*Кандидат техн наук И. Я. ЛЕХТМАН*

*Московский авиационный институт*

**Введение.** Серводвигатели постоянного тока с независимым возбуждением находят широкое применение в различных следящих системах, автоматизированном приводе, регуляторах и тому подобных объектах. Во всех этих случаях весьма важно обеспечить быстродействие и устойчивость соответствующей системы. Хорошо известно, что для создания высококачественных следящих систем и регуляторов необходимо применять серводвигатели с возможно меньшими значениями электромеханической ( $T_m$ ) и электромагнитной ( $T_{эл}$ ) постоянными времени.

Здесь предпринята попытка показать в обобщенном виде зависимость величин  $T_m$  и  $T_{эл}$  от различных конструктивных факторов и, тем самым, наметить пути снижения этих величин и их достижимые границы при существующих конструктивных формах.

**1. Обобщенное выражение электромеханической постоянной времени.** Момент, развиваемый двигателем, определяется током якоря и полем возбуждения:

$$M = k_m Bl, \quad (1,1)$$

где  $k_m$  — конструктивный коэффициент;

$B$  — среднее значение индукции под полюсом;

$I$  — ток якоря.

Дан вывод обобщенных выражений для электромеханической и электромагнитной постоянных времени серводвигателя постоянного тока с независимым возбуждением. Показано, что для серии геометрически подобных машин электромеханическая постоянная времени не зависит от габаритов. Электромагнитная постоянная времени, напротив, резко зависит от размеров и растет пропорционально кубу диаметра якоря.

Противо-Э. д. с., развивающаяся якорем при его вращении,

$$E = k_e B \Omega, \quad (2,1)$$

где  $k_e$  — конструктивный коэффициент;

$\Omega$  — скорость вращения якоря.  
Ток якоря

$$I = \frac{U - E}{R_{общ}}, \quad (3,1)$$

где  $U$  — напряжение, питающее цепь якоря;  
 $R_{общ}$  — полное сопротивление якорной цепи (включая внутреннее сопротивление источника).

Уравнение моментов

$$J \frac{d\Omega}{dt} = M + M_c, \quad (4,1)$$

где  $J$  — момент инерции якоря;

$M_c$  — момент внешней нагрузки (включая трение).

Из уравнений (1,1) — (4,1) получаем:

$$J \frac{d\Omega}{dt} + \frac{k_m k_e B^2}{R_{общ}} \Omega = \frac{k_m B}{R_{общ}} U + M_c. \quad (5,1)$$

Первый член уравнения (5,1) соответствует инерционным силам, второй член — силам электродинамического торможения, правая часть — алгебраической сумме момента короткого замыкания и момента нагрузки. Выражение  $\frac{k_m k_e B^2}{R_{общ}}$

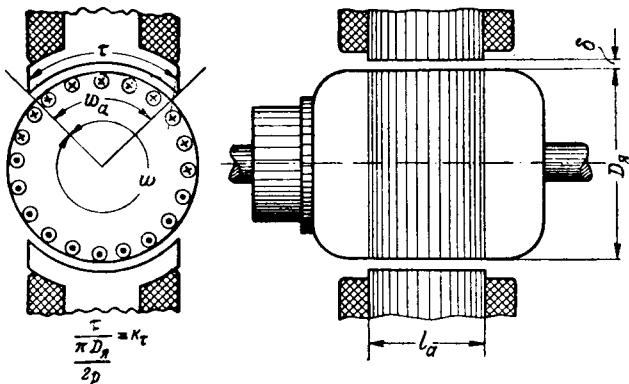


Рис. 1.

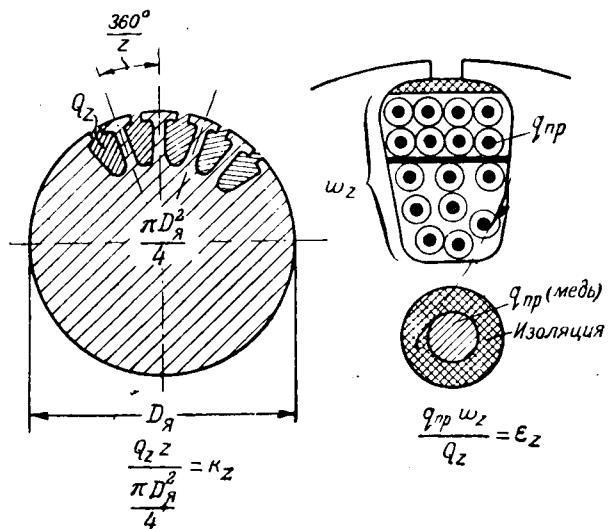


Рис. 2.

целесообразно назвать коэффициентом электродинамического торможения и обозначить одной буквой:

$$f = \frac{k_m k_e B^2}{R_{общ}}. \quad (6,1)$$

Нетрудно показать, что для случая мгновенного включения серводвигателя на постоянное по величине напряжение процесс нарастания скорости выражается экспоненциальным законом:

$$\Omega = \Omega_{уст} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_m}} \right), \quad (7,1)$$

где  $\Omega_{уст}$  — установившееся значение скорости вращения;

$T_m = \frac{J}{f}$  — электромеханическая постоянная времени.

Связем величину  $f$  с конструктивными параметрами машины. На рис. 1, 2, 3 представлены эскизы типовых конструкций якоря, паза и секции обмотки двигателя постоянного тока. Примем следующие обозначения:  $D_a$  — диаметр

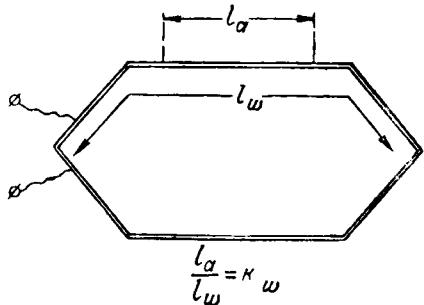


Рис. 3.

якоря;  $l_a$  — активная длина якоря, соответствующая длине полюса;  $p$  — число пар полюсов;  $t$  — ширина полюсного башмака по дуге;  $z$  — число пазов якоря;  $Q_z$  — площадь паза;  $w_z$  — число проводников в пазе;  $q_{np}$  — площадь сечения провода (по меди);  $l_w$  — длина половины секции;  $w = w_z \cdot z$  — полное число проводников в пазах;  $w_a$  — число проводников под каждым полюсом;  $a$  — число параллельных ветвей;  $I_q = \frac{l}{2a}$  — ток в каждом из проводов обмотки якоря;  $\rho$  — удельное сопротивление.

Общий момент (*г. см*), развиваемый всеми проводниками якоря,

$$M = \frac{0,1}{981} \cdot B \cdot \frac{l}{2a} \cdot l_a w_a \cdot \frac{D_a}{2} \cdot 2p.$$

Сравнивая это выражение с (1,1), находим:

$$k_u = \frac{0,1}{981} \cdot \frac{p}{a} \cdot \frac{l_a w_a D_a}{2}. \quad (8,1)$$

На рис. 4 представлена развертка обмоточной схемы якоря. Она состоит из  $2a$  — параллельных ветвей. В каждой ветви  $\frac{w}{2a}$  — проводников длиной  $l_w$  и сечением  $q_{np}$ . В создании противо-э. д. с. принимают участие не все проводники, а лишь „активные“, находящиеся под полюсами. В каждой ветви  $w_a \frac{p}{a}$  активных проводников. Так как противо-э. д. с. в ветвях равны и имеют одинаковое направление, то полная противо-э. д. с.  $E$  определяется ее значением в любой из ветвей:

$$E = 10^{-8} \cdot B l_a \frac{D_a}{2} \Omega w_a \cdot \frac{p}{a}.$$

Сравнивая это выражение с (2,1), находим

$$k_e = 10^{-8} \cdot \frac{p}{a} \cdot \frac{l_a w_a D_a}{2}. \quad (9,1)$$

Сопротивление обмотки якоря:

$$R_a = \frac{\rho l_w}{q_{np}} \cdot \frac{w}{2a} \cdot \frac{1}{2a} = \frac{\rho \cdot l_w w}{4a^2 q_{np}}. \quad (10,1)$$

В формулу (6,1) входит полное сопротивление якорной цепи, включая сопротивление источ-

<sup>1</sup> Строго говоря, выражение (7,1) справедливо при условии пренебрежения индуктивностью якоря.

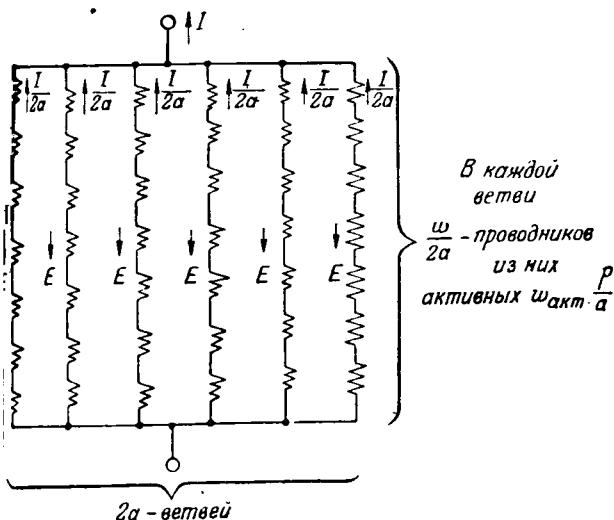


Рис. 4.

ка питания, переходное сопротивление щечных контактов и т. д.

Обозначим отношение:

$$\frac{R_a}{R_{общ}} = k_R. \quad (11,1)$$

Подставляя (8,1)–(11,1) в (6,1), находим:

$$f = k_R \frac{10^{-9}}{981} \cdot pa \frac{l_a}{l_w} \left( \frac{w_a}{w} \right)^2 q_{np} w l_a D_a^2 E^2. \quad (12,1)$$

Введем некоторые безразмерные коэффициенты:  $k_w = \frac{l_a}{l_w}$  — коэффициент использования длины якоря;  $k_\tau = \frac{w_a}{w} = \frac{\tau}{\pi D_a}$  — коэффициент полюсного перекрытия;  $k_z = \frac{Q_z z}{\pi D_a^2}$  — коэффициент использования площади листа (отношение суммарной площади пазов к площади листа);  $\varepsilon_z = \frac{q_{np} w_z}{Q_z}$  — коэффициент заполнения паза (постоянному сечению меди).

С их помощью упрощаем выражение (12,1):

$$f = \frac{\pi}{16} \cdot \frac{10^{-9}}{981} \cdot k_R k_w k_z \varepsilon_z \cdot k_\tau^2 \frac{B^2 D_a^4 l_a}{\rho}. \quad (13,1)$$

Полный момент инерции якоря  $J$  складывается из момента инерции активной части:

$$J_a = \frac{\gamma}{g} \cdot \frac{\pi D_a^4 l_a}{32}, \quad (14,1)$$

где  $\gamma$  — средний удельный вес якоря;  $g$  — ускорение силы тяжести и момента инерции всех роторных частей: коллектора, лобовых частей, втулок, вентилятора и т. п. Обозначим отношение момента инерции активной части ротора

к общему моменту инерции безразмерным коэффициентом:

$$k_j = \frac{J_a}{J}. \quad (15,1)$$

В соответствии с этим:

$$J = \frac{J_a}{k_j} = \frac{1}{k_j} \cdot \frac{\gamma}{g} \cdot \frac{\pi D_a^4 l_a}{32}. \quad (16,1)$$

Из выражения (13,1) и (16,1) находим исковую формулу для определения электромеханической постоянной времени:

$$T_m = \frac{J}{f} = \frac{981 \cdot 10^9}{2} \frac{\gamma p}{g} \times \frac{1}{B^2} \cdot \frac{1}{k_j k_R k_w \varepsilon_z \cdot k_\tau^2}. \quad (17,1)$$

Чтобы получить ответ в секундах, несобходимо подставить:  $\gamma$  — в  $gr/cm^2$ ;  $p$  — в  $ом \cdot см$ ;  $g$  — в  $см/сек^2$ ;  $B$  — в  $гс$ .

Из формулы (17,1) следует ряд интересных выводов.

1. Серия геометрически подобных машин (при условии одинаковой индукции в зазоре) будет характеризоваться одной и той же электромеханической постоянной времени  $T_m$  независимо от габаритов.

2. Постоянная времени  $T_m$  обратно пропорциональна квадрату индукции в зазоре. Для уменьшения  $T_m$  индукцию выгодно выбирать как можно большей.

3. Постоянная времени  $T_m$  не зависит ни от числа пар полюсов, ни от числа параллельных ветвей.

4. Постоянная времени  $T_m$  определяется рядом безразмерных коэффициентов, которые можно назвать „коэффициентами использования“. Величины этих коэффициентов всегда меньше единицы, причем для уменьшения  $T_m$  их выгодно увеличивать.

Кратко рассмотрим влияние отдельных факторов на коэффициенты использования.

Совершенно очевидно, что чем больше отношение длины якоря к диаметру, тем ближе  $k_j$  к единице. Поэтому применение машин с удлиненным якорем позволяет снизить постоянную  $T_m$ .

Чем выше внутреннее сопротивление усилильного устройства, питающего двигатель (машинный усилитель, генератор Леонарда и т. д.), тем меньше  $k_R$  и тем больше постоянная  $T_m$ . Отсюда следует, что регулирование скорости вращения двигателя посредством введения в его якорную цепь переменного сопротивления ухудшает инерционные качества системы. Отметим, что даже при очень малом сопротивлении источника питания коэффициент  $k_j$  будет меньше единицы из-за переходного сопротивления щеточных контактов.

Чем больше места занимают лобовые части обмотки, тем меньше  $k_w$  и тем больше  $T_m$ .

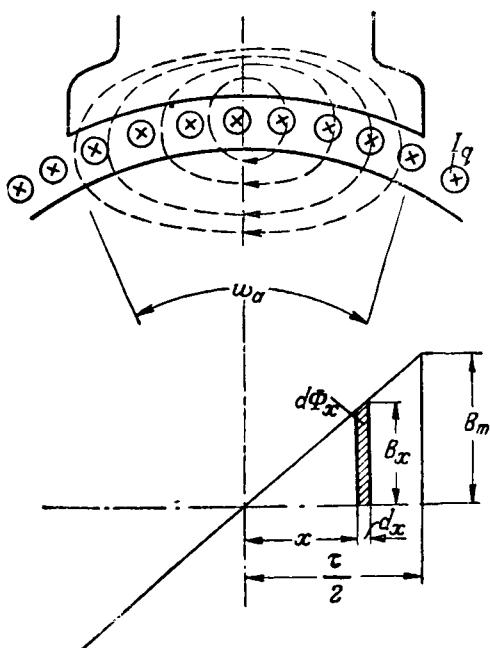


Рис. 5.

Применение машин с удлиненным якорем, позволяет получить большие значения  $k_w$ .

Согласно формулы (17,1) увеличение относительной площади пазов позволяет уменьшить  $T_m$ , однако следует иметь в виду, что при этом происходит утоньшение зубцов, вследствие чего может упасть индукция в зазоре, так как практически величина индукции лимитируется не столько мощностью в обмотке возбуждения, сколько насыщением зубцового слоя. Учитывая эти сбои фактора, можно найти оптимальное значение  $k_z$  в конкретных случаях расчета.

Нетрудно видеть, что повышение коэффициента заполнения паза  $\epsilon_z$  уменьшает постоянную  $T_m$ . В этом отношении может сыграть благоприятную роль переход от проводов с бумажной и шелковой изоляцией к проводам со стойкой эмалевой или оксидной изоляцией. Это обстоятельство может оказаться особенно существенным в маломощных двигателях, где приходится применять провода тонкого сечения.

Величина  $k_t$  (коэффициент полюсного перекрытия) установилась в практике около значения 0,6—0,7. Дальнейшее увеличение ширины полюсного башмака обычно невыгодно, так как приводит к увеличению рассеяния и уменьшению индукции под полюсом.

Таким образом, при установленнойся общепринятой конструкции двигателей постоянного тока с приблизительно одинаковыми соотношениями геометрических размеров следует ожидать, что все они будут характеризоваться довольно близкими значениями постоянной  $T_m$  и что основное средство уменьшения  $T_m$  — это увеличение индукции под полюсом.

Приведем числовой пример. Положим:  $\gamma = 7,5 \text{ гр}/\text{см}^3$ ;  $\rho = 1,75 \cdot 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{см}$ ;  $g = 981 \text{ см}/\text{сек}^2$ ;  $B = 5000 \text{ Гс}$ ;  $k_j = 0,6$ ;  $k_R = 0,8$ ;  $k_w = 0,4$ ;  $k_z = 0,4$ ;  $\epsilon_z = 0,2$ ;  $k_t = 0,7$ .

Тогда, согласно (17,1):

$$T_m = \frac{981 \cdot 10^9 \cdot 7,5 \cdot 1,75 \cdot 10^6}{2 \cdot 981} \times \\ \times \frac{1}{5000^2} \frac{1}{0,6 \cdot 0,8 \cdot 0,4 \cdot 0,4 \cdot 0,2 \cdot 0,7^2} = 0,035 \text{ сек.}$$

Полученное значение  $T_m$  хорошо совпадает с известными данными по существующим двигателям постоянного тока (приложение).

**2. Обобщенное выражение электромагнитной постоянной времени.** Оговорим основные допущения, принятые в дальнейших расчетах: 1) полагаем зазор между полюсом и якорем равномерным; 2) полагаем, что индуктивность якоря не зависит от вращения, т. е. пренебрегаем влиянием коммутируемых секций; 3) пренебрегаем насыщением стали полюсов и якоря.

На рис. 5 изображена картина распределения потоков якоря, замыкающихся через воздушный зазор. Магнитодвижущая сила якоря распределена по линейному закону и закон распределения индукции поля якоря также будет линейным:

$$B_x = B_m \cdot \frac{x}{\tau}, \quad (1,2)$$

где  $x$  — расстояние от оси полюса;  $B_m$  — индукция под краем полюса.

Элементарный поток  $d\Phi_x$  в трубке, расположенной на расстоянии  $x$  от оси полюса,

$$d\Phi_x = B_x l_a dx. \quad (2,2)$$

Поток  $d\Phi_x$  сцеплен с  $w_a \frac{x}{\tau/2}$  числом проводов. Следовательно, он создает потокосцепление:

$$d\Psi_x = d\Phi_x w_a \frac{x}{\tau/2}. \quad (3,2)$$

Интегрируя в пределах от 0 до  $\tau/2$ , находим потокосцепление  $w_a$  проводов, расположенных под одним полюсом:

$$\Psi_n = \int_{x=0}^{\tau/2} d\Psi_x = \frac{1}{6} B_m l_a \tau w_a. \quad (4,2)$$

Величина

$$B_m = \frac{0,4\pi\mu_0 I_q w_a}{2\delta}, \quad (5,2)$$

где  $\mu_0$  — магнитная проницаемость воздуха;  $I_q$  — ток в проводниках якоря;  $\delta$  — воздушный зазор между якорем и полюсом.

Подставляем (5,2) в (4,2):

$$\Psi_n = \frac{0,4\pi\mu_0}{12\delta} \cdot w_a^2 l_a \tau I_q. \quad (6,2)$$

Индуктивность обмотки, расположенной под одним полюсом:

$$L_n = \frac{\Psi_n}{I_q} 10^{-8} = \frac{0.4\pi\mu_0}{12\delta} w_a^2 l_a \tau 10^{-8}. \quad (7.2)$$

Потокосцепление  $\Psi_n$  охватывает  $w_a$  проводов, однако на каждый полюс приходится  $\frac{w}{2p}$  проводов. Поэтому следует считать, что омическое сопротивление обмотки, расположенной под одним полюсом,  $R_n = \frac{l_w}{q_{np}} \cdot \frac{w}{2p}$ , а электромагнитная постоянная времени этой части обмотки:

$$T_{emn} = \frac{L_n}{R_n} = \frac{0.4\pi\mu_0}{12\delta} \cdot 10^{-8} \frac{w_a^2 l_a \tau}{\rho w l_w} 2p q_{np}. \quad (8.2)$$

При любой схеме соединений якорной обмотки она будет составлена из элементов с одной и той же постоянной времени  $T_{emn}$ . Поэтому общая электромагнитная постоянная времени всей обмотки  $T_{em}$  также будет равна  $T_{emn}$ . Учитывая, что

$$\frac{w_a}{w} = \frac{k_z}{2p}$$

$$q_{np} w = \epsilon_z Q_z z = \epsilon_z k_z \frac{\pi D_x^2}{4}$$

$$\frac{l_a}{l_w} = k_w$$

$$\tau 2p = \pi D_x k_z$$

преобразуем (8.2):

$$T_{em} = \frac{\pi^2}{192} \cdot 10^{-8} \frac{0.4\pi\mu_0}{\rho} \cdot \frac{k_R k_w \cdot k_z \epsilon_z k_z^3}{k_L p^2} \cdot \frac{D_x^3}{\delta}. \quad (9.2)$$

Электромагнитная постоянная  $T_{em}$  зависит не только от сопротивления обмотки якоря, но и от общего сопротивления цепи, поэтому в формулу (9.2) включен коэффициент  $k_R$ . Кроме того, эту же формулу включен коэффициент  $k_L$ , связанный отношением индуктивности активных частей обмотки к полной индуктивности якоря, включая сюда рассеяние в пазах и лобовых частях.

Приведем числовой пример. Положим:  $\rho = 1 \text{ ом} \cdot \text{сек}/\text{см}$ ;  $\rho = 1,75 \cdot 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{см}$ ;  $k_R = 0,8$ ;  $k_L = 0,8$ ;  $k_w = 0,4$ ;  $k_z = 0,4$ ;  $\epsilon_z = 0,2$ ;  $k_z = 0,7$ ;  $\tau = 1$ ;  $D_x = 3 \text{ см}$ ;  $\delta = 0,03 \text{ см}$ .

$$T_{em} = \frac{\pi^2}{192} \cdot 10^{-8} \frac{0.4 \cdot \pi \cdot 1}{1.75 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{0.8 \cdot 0.4 \cdot 0.4 \cdot 0.2 \cdot 0.7^3}{0.8 \cdot 1^2} \cdot \frac{3^3}{0.03} =$$

$$= 0,0037 \text{ сек.}$$

Найденное значение  $T_{em}$  совпадает с экспериментальными результатами по аналогичным двигателям.

Сравнение формулы (9.2) с формулой (17.1) позволяет сделать некоторые выводы.

1. Нетрудно видеть, что почти все безразмерные коэффициенты использования  $k_R$ ;  $k_w$ ;  $k_z$ ;

$\epsilon_z$ ;  $k_z$  и один размерный коэффициент  $\rho$  оказывают прямо противоположное влияние на электромеханическую  $T_{em}$  и электрическую  $T_{em}$  постоянные времени. Поэтому стремление уменьшить  $T_{em}$  путем увеличения перечисленных коэффициентов неизбежно приводит к росту  $T_{em}$ .

2. Электромагнитная постоянная времени весьма резко зависит от размеров двигателя: она прямо пропорциональна кубу диаметра и обратно пропорциональна величине воздушного зазора.

3. Электромагнитная постоянная времени обратно пропорциональна квадрату числа пар полюсов  $p$ . Поскольку  $T_{em}$  не зависит от  $p$ , увеличение  $p$  может позволить уменьшить  $T_{em}$ , не увеличивая  $T_{em}$  (если будет обеспечено то же значение индукции под полюсом).

Из изложенного выше следует, что при существующей традиционной конструкции серводвигателей постоянного тока с зубцовым якорем возможности уменьшения инерционных параметров ( $T_{em}$  и  $T_{em}$ ) ограничены. В тех случаях, когда необходимо иметь двигатели с меньшей инерционностью, следует искать какие-то иные конструктивные решения. Одним из возможных путей в этом направлении является применение двигателей постоянного тока с колоколообразной конструкцией якоря (что встречается пока лишь в маломощных системах). Другим возможным решением задачи может быть переход к сервоприводу переменного тока и применение асинхронных двигателей с тонкостенным ротором. К этим вопросам мы намерены вернуться позднее.

**Приложение. Упрощенный метод определения электромеханической постоянной времени по паспортным данным машины.** Конструктору, подыскивающему готовый серводвигатель для какой-либо новой автоматической системы, не всегда бывает известна электромеханическая постоянная времени  $T_{em}$  того или иного двигателя. Однако, если имеются сведения о моменте инерции якоря (в случае необходимости его можно приблизенно определить по чертежу) и известны основные паспортные данные машины (механическая мощность на валу  $P_N$ ; скорость вращения  $\Omega_N$ ; ток якоря  $I_N$ ; напряжение на зажимах якоря  $U_N$ ; сопротивление якорной цепи  $R_x$ ), то приближенное определение постоянной  $T_{em}$  может быть произведено весьма быстро даже при неизвестных нагрузочных характеристиках двигателя.

Действительно, момент, развиваемый двигателем:

$$M_N = \frac{P_N}{\Omega_N} = k_x B I_N, \quad (1)$$

откуда

$$k_x B = \frac{P_N}{I_N \Omega_N}. \quad (2)$$

В том же режиме:

$$E_N = U_N - I_N R_a = k_e B \cdot \Omega_N, \quad (3)$$

откуда

$$k_e B = \frac{U_N - I_N R_a}{\Omega_N}. \quad (4)$$

Таким образом, коэффициент электродинамического торможения:

$$f = \frac{k_m k_e B^2}{R_a} = \frac{P_N (U_N - I_N R_a)}{\Omega_N^2 I_N R_a} \quad (5)$$

и электромеханическая постоянная времени:

$$T_m = \frac{J}{f} = J \frac{I_N R_a \Omega^2}{P_N (U_N - I_N R_a)}. \quad (6)$$

Для получения ответа в секундах необходимо подставлять:  $J$  — в  $\text{гр}\cdot\text{см}\cdot\text{сек}^2$ ;  $I_N$  — в  $a$ ;  $\Omega$  — в  $\text{рад}/\text{сек}$ ;  $P_N$  — в  $\text{гр}\cdot\text{см}/\text{сек}$ ;  $U_N$  в  $v$ ;  $R_a$  — в  $\text{ом}$ .

Если все потери в машине, помимо потерь в меди якоря, малы по сравнению с общей мощностью на валу, то можно считать:

$$P_N = (U_N - I_N R_a) I_N. \quad (7)$$

и тогда формула (6) может быть с достаточной точностью записана в следующих двух вариантах:

$$T_m = J \frac{\Omega_N^2 R_a}{(U_N - I_N R_a)^2}, \quad (8)$$

или

$$T_m = J \frac{\Omega_N^2 I_N^2 R_a}{P_N^2}. \quad (9)$$

Каждый из них имеет то преимущество, что позволяет найти ответ при меньшем числе исходных данных (без  $P_N$  или без  $U_N$ ).

Чем больше указанные потери, тем более значительные расхождения получаются при пользовании разными формулами. Формула (8) дает самое малое значение  $T_m$ , формула (9) — самое большое, а формула (6) — промежуточное между ними. Чем мощнее двигатель, тем меньше удельный вес потерь, неучтенных формулой (7), и тем теснее сближаются значения  $T_m$ , определяемые формулами (6), (8) и (9).

Наиболее целесообразно пользоваться формулой (6), особенно для маломощных двигателей. С ее помощью мы определили постоянные  $T_m$  нескольких реально существующих двигателей мощностью от 7 до 370  $\text{вт}$ . Основные параметры этих машин приводятся ниже в виде таблицы.

Таблица показывает, что постоянная  $T_m$  действительно меняется в сравнительно узких пределах при переходе от одного габарита к другому и что реально существующие значения  $T_m$  близки к цифре, найденной в разделе 1.

Механическая мощность $P_N$ , $\text{вт}$	Напряжение $U_N$ , $v$	Ток якоря $I_N$ , $a$	Сопротивление якоря $R_a$ , $\text{ом}$	Скорость вращения $\Omega$ , $\text{об}/\text{мин}$	Момент $J$ , $\text{гр}\cdot\text{см} \cdot \text{сек}^2$	Электромеханическая постоянная $T_m$ , $\text{сек}$
7	110	0,14	215	5 000	0,04	58
8,5	110	0,15	170	4 000	0,05	30
13	110	0,25	115	3 600	0,14	53
24	110	0,4	51	3 600	0,2	26
38	110	0,6	27	3 000	0,6	26
55	110	0,8	19	3 600	0,7	28
370	250	1,9	6,9	3 450	20,6	39

[15. 1. 1948]



### О ЗОЛОТОЙ МЕДАЛИ имени А. С. ПОПОВА

Президиум Академии наук СССР объявляет о конкурсе на соискание золотой медали имени А. С. Попова, присуждаемой за выдающиеся научные работы и изобретения в области радио.

Право на соискание медали им. А. С. Попова имеют как советские, так и зарубежные ученые.

Работы, законченные в 1949 г., могут представляться научными обществами, научно-исследовательскими институтами, высшими учебными заведениями, ведомствами, общественными организациями и отдельными гражданами на любом языке в 3-х экземплярах, напечатанных на пишущей машинке или типографским способом.

К работе должны быть приложены отзывы организаций, представляющих работу на соискание медали, о научной ценности и значении работы для развития радио и краткие биографические сведения об авторе с перечнем его основных научных работ и изобретений.

Срок представления работ — не позже 1 февраля 1950 г.

Работы с надписью «На соискание золотой медали имени А. С. Попова» направлять в Совет по радиофизике и радиотехнике Академии наук СССР — г. Москва, 3-я Миусская ул., д. 3.

Справки по телефону Д 1-03-68.

Президиум Академии наук СССР

# Чувствительность электрических измерительных цепей

Кандидат техн. наук И. Н. КРОТКОВ

Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии им. Менделеева

Одним из факторов, определяющих качество работы схемы, является ее чувствительность по отношению к измеряемой величине. Среди работ, относящихся к вопросам расчета чувствительности, следует отметить обобщения [Л. 1—4], полученные путем представления измерительной цепи как многополюсника. Эти материалы представляют большую ценность, однако они содержат отдельные выражения (например, взаимные сопротивления плеч), способ вычисления которых не указывается.

В данной статье на основании некоторых общих рассуждений приводятся новые формулы для расчета чувствительности схемы  $(\dot{S})_0$ , считая возмущающее действие  $\Delta z_w$  стремящимся к нулю. В этих формулах чувствительность схемы выражается через параметры электрической цепи как четырехполюсника, характеризуя последний коэффициентами общих матриц, двух соответственно выбранных четырехполюсников.

Будем искать чувствительность схемы к относительному изменению полного сопротивления регулируемого плеча  $\frac{\Delta z_w}{z_w}$  многополюсника, представляющего заданную схему.

Замечая изменение тока  $\Delta I_y$ , вызванное в цепи индикатора вариацией сопротивления  $\Delta z_w$  регулируемого плеча, напишем для относительной чувствительности схемы по току:

$$\lim_{\Delta z_w \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta I_y}{\Delta z_w} \right) z_w = \frac{dI_y}{dz_w} z_w = (\dot{S}_i)_0;$$

где

$$I_y = I_y e^{j\psi_i} \text{ и } z_w = z_w e^{j\varphi}.$$

Аналогично будем иметь относительную чувствительность схемы по напряжению

$$\lim_{\Delta z_w \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta U_y}{\Delta z_w} \right) z_w = \frac{dU_y}{dz_w} z_w = (\dot{S}_u)_0,$$

где

$$U_y = U_y e^{j\psi_u}.$$

Приведены новые расчетные формулы чувствительности электрических измерительных схем, рассмотренных как четырехполюсники. Даны примеры расчета предложенным способом.

Здесь имеет значение, как составлено регулируемое плечно четырехполюсника, т. е. какова зависимость между регулируемым параметром  $w$  и полным сопротивлением  $z_w$ .

Будем различать: а) простые (однородные) плечи:  $z_w = w$ ; б) сложные (неоднородные) плечи:  $z_w = f(w)$ ,  $z_w = f(w_1, w_2)$ .

Применяя четырехполюсник с неоднородным регулируемым плечом, предназначенный для измерения какой-либо одной величины, может оказаться необходимым ввести понятие о чувствительности схемы по отношению к регулируемому элементу  $w$  или к измеряемой величине. Тогда по аналогии можно составить:

$$[(\dot{S}_i)_0]_w = \frac{dI_y}{dw} w \text{ и } [(\dot{S}_u)_0]_w = \frac{dU_y}{dw} w$$

или после преобразования:

$$[(\dot{S}_i)_0]_w = \frac{dI_y}{dz_w} \frac{dz_w}{dw} w = (\dot{S}_i)_0 \frac{dz_w}{dw} \frac{w}{z_w} = (\dot{S}_i)_0 k. \quad (1)$$

Величина множителя  $k$  зависит от рода элементов регулируемого плеча  $z_w$  и способа их соединения. В каждом отдельном случае легко вычислить по формуле (1) значение упомянутого множителя  $k$ , располагая параметрами схемы и видом элемента регулируемого плеча.

**Теоретические соображения.** Будем рассматривать измерительную цепь, составленную из некоторого числа линейных элементов, поставив себе задачей найти относительную чувствительность схемы. Измерительную схему всегда можно заменить четырехполюсником, приведенным на рис. 1. Применим искусственный прием, заключающийся в независимом рассмотрении следующих двух четырехполюсников.

Вначале представим измерительную схему в виде пассивного четырехполюсника, получающего питание от источника э. д. с.  $E$  и нагруженного регулируемым сопротивлением  $z_w$  (рис. 2). Отсюда легко найти выражение для тока  $I_w$ .

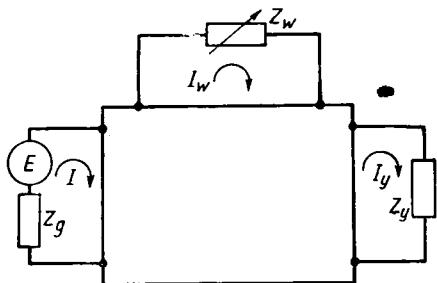


Рис. 1.

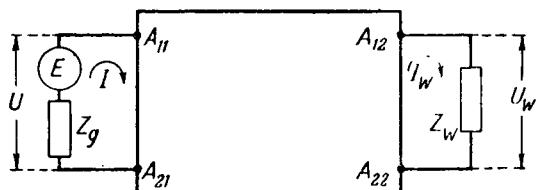


Рис. 2.

Для расчета воспользуемся коэффициентами, образующими общую матрицу:

$$A = \begin{vmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{vmatrix},$$

которую мы будем называть в дальнейшем — матрицей  $A$ .

На основании общезвестных положений для рассматриваемого четырехполюсника можно написать:

$$\left. \begin{array}{l} \dot{U} = A_{11}\dot{U}_w + A_{12}I_w, \\ I = A_{21}\dot{U}_w + A_{22}I_w, \end{array} \right\} \quad (2)$$

или в матричной форме

$$\begin{vmatrix} \dot{U} \\ I \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \dot{U}_w \\ I_w \end{vmatrix},$$

и определитель

$$A_{11}A_{22} - A_{21}A_{12} = 1.$$

Принимая во внимание (рис. 2), что

$$\left. \begin{array}{l} \dot{E} = \dot{U} + Iz_s, \\ \dot{U}_w = I_wz_w, \end{array} \right\}$$

и исключая  $I_w$  из уравнения (2), найдем:

$$I_w = \frac{\dot{E}}{A_{12} + A_{11}z_w + A_{21}z_w z_s + A_{22}z_s}. \quad (3)$$

Последнее перепишем так:

$$I_w = \frac{1}{(A_{11} + A_{21}z_g)} - \frac{\dot{E}}{(z_w + (z_{ww})_g)}.$$

Здесь:

$$(z_{ww})_g = \frac{A_{12} + A_{21}z_g}{A_{11} + A_{21}z_g}$$

и имеет смысл входного сопротивления четырехполюсника со стороны регулируемого плеча  $z_w$ , считая, что к двум другим зажимам при-

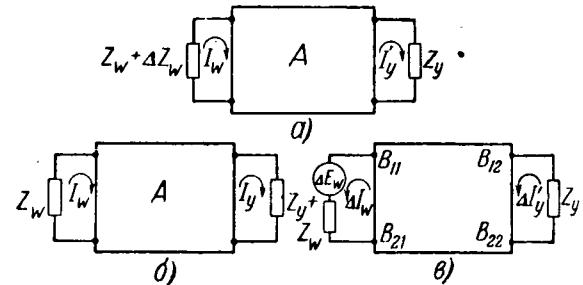


Рис. 3.

соединено сопротивление  $z_g$ . Передача энергии в этом случае происходит в обратном направлении.

На основании свойств линейности схемы, кроме того, можем написать:

$$I_w = \frac{\dot{E}}{z_{gw}} = \frac{1}{(A_{11} + A_{21}z_g)} \cdot \frac{\dot{E}}{[z_w + (z_{ww})_g]}, \quad (3a)$$

здесь  $z_{gw}$  — взаимное сопротивление ветвей генератора и регулируемого элемента.

Теперь представим себе заданную схему в виде второго четырехполюсника, включая в одну пару его зажимов регулируемое сопротивление  $z_w$ , а в другую — сопротивление индикатора  $z_y$ . Следует обратить внимание, что получившийся четырехполюсник (рис. 3, a) будет активным. Имея в виду ранее поставленную задачу, нам следует найти изменение тока в индикаторе, вызванное относительной разбалансировкой  $\frac{\Delta z_w}{z_w}$  регулируемого плеча.

Полученный сейчас четырехполюсник заменяется [Л. 1] двумя новыми (схемы б и в на рис. 3). Применяя метод наложения, находим токи, протекающие в плечах регулируемого элемента  $I'_w$  и индикатора  $I'_y$ :

$$\left. \begin{array}{l} I'_w = I_w - \Delta I_w, \\ I'_y = I_y - \Delta I_y, \end{array} \right\}$$

Здесь обозначены:  $I_w$  и  $I_y$  — токи, протекающие в соответствующих плечах четырехполюсника при условии, что схема сбалансирована ( $\Delta z_w = 0$ ). Появление тока  $\Delta I_y$  можно приписать некоторой фиктивной э. д. с.  $\Delta E_w$ , включенной последовательно с регулируемым сопротивлением (рис. 3, б).

Найдем ток  $\Delta I_y$ , для чего рассмотрим отдельно пассивный четырехполюсник, изображенный на рис. 3, б.

Тогда по аналогии с (2) может написать

$$\Delta I_y = \frac{\Delta P_w}{B_{12} + B_{11}z_y + B_{22}z_w + B_{21}z_w z_y}.$$

Коэффициенты данного четырехполюсника образуют матрицу:

$$B = \begin{vmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{vmatrix}; \quad B_{11}B_{22} - B_{12}B_{21} = 1,$$

оторую в дальнейшем будем называть „матрицей В“.

На основании принципа компенсации можно записать для э. д. с.  $\Delta E_w$ .

$$\Delta E_w = I'_w \Delta z_w = (I_w - \Delta I_w) \Delta z_w.$$

Тогда

$$\Delta I_y = \frac{I'_w \Delta z_w}{B_{12} + B_{11}z_y + B_{22}z_w + B_{21}z_w z_y}. \quad (4)$$

Прибегая к преобразованиям подобно приведенным выше

$$(z_{ww})_y = \frac{B_{12} + B_{11}z_y}{B_{22} + B_{21}z_y},$$

получим

$$\Delta I_y = \frac{I'_w \Delta z_w}{(B_{22} + B_{21}z_y)[z_w + (z_{ww})_y]}.$$

Надо иметь в виду, что по физическому смыслу

$$(z_{ww})_y = (z_{ww})_g = z_{ww}.$$

Свойства линейности схемы дают возможность написать

$$\Delta I_y = \frac{I'_w \Delta z_w}{z_{wy}}, \quad (4a)$$

где  $z_{wy}$  — взаимное сопротивление регулируемого  $w$  и индикаторного элемента.

Теперь из сравнения (3) и (3a), (4) и (4a) следует, что:

$$z_{wg} = A_{12} + A_{11}z_w + A_{21}z_w z_g + A_{22}z_g = \\ = (A_{11} + A_{21}z_g)[z_w + (z_{ww})_g],$$

$$z_{wy} = B_{12} + B_{11}z_y + B_{21}z_w z_y + B_{22}z_w = \\ = (B_{22} + B_{21}z_y)[z_w + (z_{ww})_g].$$

Перейдем к окончательному решению задачи. Согласно определению и уравнению (4) относительная чувствительность схемы будет:

$$(\dot{S}_i)_0 = \lim_{\Delta z_w \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta I_y}{\Delta z_w} \right) z_w =$$

$$= \frac{I_w z_w}{B_{12} + B_{11}z_y + B_{22}z_w + B_{21}z_w z_y};$$

$$(\dot{S}_u)_0 = \lim_{\Delta z_w \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta I_y}{\Delta z_w} \right) z_w =$$

$$= \frac{I_w z_w z_y}{B_{12} + B_{11}z_y + B_{22}z_w + B_{21}z_w z_y}, \quad (46)$$

Отсюда, принимая во внимание (3), получим окончательно

$$(\dot{S}_i)_0 = \dot{E} \frac{z_w}{(A_{12} + A_{11}z_w + A_{21}z_w z_y + A_{22}z_g)} \times \\ \times \frac{1}{(B_{12} + B_{11}z_y + B_{21}z_w z_y + B_{22}z_w)}; \quad (5)$$

$$(\dot{S}_u)_0 = \dot{E} \frac{z_w}{(A_{12} + A_{11}z_w + A_{21}z_w z_y + A_{22}z_g)} \times \\ \times \frac{z_y}{(B_{12} + B_{11}z_y + B_{21}z_w z_y + B_{22}z_w)},$$

или в другой форме:

$$\left. \begin{aligned} (\dot{S}_i)_0 &= \dot{E} \frac{z_w}{(A_{11} + A_{21}z_g)(B_{22} + B_{21}z_y)[z_w + z_{ww}]^2} = \\ &= \dot{E} \frac{z_w}{z_{gw} z_{wy}}; \\ (\dot{S}_u)_0 &= \dot{E} \frac{z_w z_y}{(A_{11} + A_{21}z_g)(B_{22} + B_{21}z_y)[z_w + z_{ww}]^2} = \\ &= E \frac{z_w z_y}{z_{gw} z_{wy}}. \end{aligned} \right\} \quad (5a)$$

В ряде случаев чувствительность схемы удобно выражать через напряжение  $U$ , приложенное к зажимам источника питания или через силу неразветвленного тока  $I$ . В соответствии с обозначениями рис. 2, будет справедливо:

$$U = I(z_{gg})w,$$

где  $(z_{gg})_w = \frac{A_{12} + A_{11}z_w}{A_{22} + A_{21}z_w}$  — означает входное сопротивление четырехполюсника со стороны зажимов  $gg$ , считая, что на остальные зажимы включено сопротивление  $z_w$ .

Решая (2) относительно  $I_w$ , получим:

$$I_w = \frac{U}{(z_{gg})_w [A_{12} + A_{22} + (A_{11} + A_{21})z_w]} = \frac{U}{A_{11}z_w + A_{12}};$$

$$I_w = \frac{U}{[A_{12} + A_{22} + (A_{11} + A_{21})z_w]} = \frac{i}{A_{21}z_w + A_{22}};$$

отсюда на основании (4б) будем иметь:

$$\left. \begin{aligned} (\dot{S}_i)_0 &= \frac{U}{(A_{11}z_w + A_{12})(B_{21}z_y + B_{22})} \frac{1}{[z_w + z_{ww}]} \frac{z_w}{z_{gw}} = \\ &= \frac{U}{A_{11}z_w + A_{12}} \frac{1}{z_{gw}} \frac{z_w}{z_{gw}}; \\ (\dot{S}_i)_0 &= \frac{i}{(A_{21}z_w + A_{22})(B_{21}z_y + B_{22})} \frac{1}{[z_w + z_{ww}]} \frac{z_w}{z_{gw}} = \\ &= i \frac{1}{A_{21}z_w + A_{22}} \frac{z_w}{z_{gw}}. \end{aligned} \right\} \quad (56)$$

Примеры расчета чувствительности измерительных схем. Приведем расчет схем постоянного тока, обычно применяемых при измерении сопротивлений. Эти схемы в дальнейшем называются «схемы одного прибора» (рис. 4) и «мостовая» (рис. 5).

Для вычисления коэффициентов, образующих матрицы А и В, упомянутые схемы следует представить в виде соответствующих четырехполюсников. Подобное представление заключается в простом перечерчивании каждой схемы, принимая во внимание сопротивления, которые

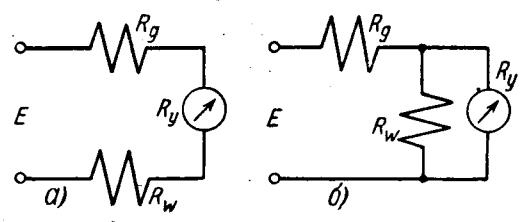


Рис. 4.

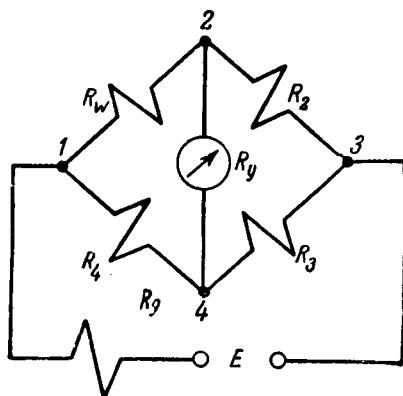


Рис. 5.

присоединены к входным и выходным зажимам четырехполюсника. В результате этих действий для перечисленных схем были получены четырехполюсники рис. 6. Дальнейшие преобразования, необходимые для вычисления коэффициентов матриц  $A$  и  $B$ , общезвестны из теории четырехполюсников [Л. 6].

Для обеих схем регулируемое плечо является однородным (постоянный ток), соединение элементов последовательным, поэтому следует принять  $k=1$ .

*Схема одного прибора.* Как известно, наибольшее распространение нашли следующие две схемы включения прибора (омметры): а — схема последовательного включения (рис. 4, а) и б — схема параллельного включения (рис. 4, б).

В соответствии с рис. 6 коэффициенты, составляющие матрицы  $A$  и  $B$ , будут:

для последовательного включения

$$A = \begin{vmatrix} 1 & R_y \\ 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad B = \begin{vmatrix} 1 & R_g \\ 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Для параллельного включения

$$A = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{R_y} & 1 \end{vmatrix}; \quad B = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{R_g} & 1 \end{vmatrix}.$$

Применяя формулы (3) и (5), можно сразу же написать выражения тока в плече регулируемого элемента  $I_w$  и чувствительности схемы.

а) Для последовательного включения

$$I_w = \frac{E}{R_w + R_g + R_y}; \quad S_i = E \frac{R_w}{(R_w + R_g + R_y)^2}; \quad S_u = E \frac{R_w R_y}{(R_w + R_g + R_y)^2}.$$

б) Для параллельного включения

$$I_w = \frac{E}{R_g + R_w \left(1 + \frac{R_g}{R_w}\right)}; \quad S_i = E \frac{R_g R_y R_w}{[R_w (R_g + R_y) + R_g R_y]^2};$$

$$(S_i)_0 = \frac{E}{\left[R_w \left(1 + \frac{R_g}{R_3 + R_4}\right) + R_g \left(1 + \frac{R_2}{R_3 + R_4}\right) + R_2\right] \left[\left(R_w + R_y + \frac{R_w}{R_2} \left(R_y + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}\right)\right) + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}\right]};$$

или окончательно после преобразований

$$(S_i)_0 = E \frac{R_w / R_3}{\left[1 + \frac{R_w}{R_2} + \frac{R_g}{R_w} \left(1 + \frac{R_w}{R_4}\right) \frac{R_w}{R_2}\right]} \frac{1}{\left[R_w \left(1 + \frac{R_4}{R_w}\right) + R_y \left(1 + \frac{R_w}{R_2}\right)\right]};$$

$$(S_u)_0 = E \frac{R_w / R_2}{\left[1 + \frac{R_w}{R_2} + \frac{R_g}{R_w} \left(1 + \frac{R_w}{R_4}\right) \frac{R_w}{R_2}\right]} \frac{1}{\left[1 + \frac{R_w}{R_2} + \frac{R_w}{R_y} \left(1 + \frac{R_4}{R_w}\right)\right]}.$$

Назначение схемы		
Одного прибора Параллельное соединение		
Мостовая (не уравновешенная)		
Мостовая (не уравновешенная)		

Рис. 6.

$$S_u = E \frac{R_g R_y^2 R_w}{[R_w (R_g + R_y) + R_g R_y]^2}.$$

*Мостовая схема.* В соответствии с обозначениями рис. 5 мостовая схема может быть представлена четырехполюсниками, характеризуемыми коэффициентами  $A$  и  $B$  (рис. 6).

Если принять во внимание, что при равновесии моста величина тока  $I_w$  не зависит от сопротивления индикатора  $R_y$  и цепь последнего можно даже считать разорванной, то матрица  $A$  будет:

$$A = \begin{vmatrix} 1 & R_2 \\ \frac{1}{R_3 + R_4} & 1 + \frac{R_2}{R_3 + R_4} \end{vmatrix}.$$

Аналогично, для другой диагонали моста, положим  $R_g = 0$ , можно написать

$$B = \begin{vmatrix} 1 & \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} \\ \frac{1}{R_2} & 1 + \frac{1}{R_2} \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} \end{vmatrix},$$

Отсюда для тока  $I_w$  и чувствительности схемы ( $S_i$ ) по формуле (3) и (5) получим сразу:

$$I_w = \frac{E}{R_w \left(1 + \frac{R_g}{R_3 + R_4}\right) + R_g \left(1 + \frac{R_2}{R_3 + R_4}\right) + R_2};$$

$$R_w$$

6

Последнее уравнение тождественно указанным друг авторами, однако в приводимой форме оно значительно удобнее для дальнейших исследований.

**Заключение.** 1. Получены формулы (5), (5а), (5б), выражающие относительную чувствительность ( $S_0$ ) любой линейной электрической схемы изменению одного из ее сопротивлений ( $z_w$ ), зависимости от: а) общих параметров данной цепи (коэффициенты общих матриц); б) одной из величин, характеризующих действие источника тока (э. д. с., напряжение, ток, мощность в регулируемом элементе).

Измерительная цепь задается в виде четырехполюсника, однако решение задачи сводится к расчету двух четырехполюсников, характеризуемых коэффициентами общих матриц.

2. Приведенные формулы (5), (5а), (5б) могут иметь значение при дальнейшей разработке теории измерительных цепей, принимая способы матричного исчисления.

Следует отметить, что составляющие упомянутых

формул имеют определенный физический смысл (взаимные сопротивления ветвей, входное сопротивление четырехполюсника). Последнее облегчает нахождение общих свойств измерительных цепей.

3. При изучении сложных электрических схем и соединений их элементов для ускорения и упрощения расчетов можно пользоваться таблицами коэффициентов матриц, приводимых в учебных и справочных изданиях.

### Литература

1. К. М. Поливанов. Электричество, № 2, 1946.
2. К. М. Поливанов. Электричество, № 7, 1947.
3. М. И. Левин. Электричество, № 2, 1946.
4. М. И. Левин. Электричество, № 7, 1947.
5. И. Н. Кротков. Применение дифференциального гальванометра для измерения температурного коэффициента. Труды ВНИИМ, 1939.
6. П. К. Акульшин. И. А. Кощеев и К. Е. Кульбакский. Теория связи по проводам. Связьздат, 1940.

[3. 12. 1948]



## Схемы замещения трансформаторов с расщепленными обмотками

*Кандидат техн. наук В. А. ПОЛЕВОЙ*

*Московский энергетический институт им. Молотова*

В практике проектирования электрических станций за последнее время получают все большее распространение трансформаторы с расщепленными обмотками. Применение их позволяет значительно уменьшить токи к. з., повысить надежность и снизить стоимость электрической установки [Л. 1]. Для производства расчетов токов к. з. при наличии трансформаторов с расщепленными обмотками необходимо установить практически удобные схемы замещения этих трансформаторов. Ниже приводятся возможные упрощенные схемы замещения трансформаторов с расщепленными обмотками.

В трансформаторах с расщепленными обмотками одна или несколько обмоток разделены электрически на отдельные цепи, имеющие обычно равные номинальные мощности, одинаковые реактивные характеристики и предназначенные для присоединения к независимым источникам энергии или независимым нагрузкам одинакового напряжения.

На рис. 1,а условно показан трансформатор одной нерасщепленной и одной расщепленной за две цепи обмотками.

Если цепи расщепленной обмотки работают при одинаковых нагрузках с равными коэффициентами мощности, то в трансформаторе проходит передача только сквозной мощности

В работе приводятся возможные схемы замещения трансформаторов с расщепленными обмотками применительно к практическим расчетам токов к. з. В целях упрощения при составлении схем не учитываются токи намагничивания трансформатора. Выведены необходимые соотношения для определения реактивных ветвей схемы замещения четырехобмоточного трансформатора и упрощенной схемы замещения трансформатора с расщепленной обмоткой. Для иллюстрации дан пример на составление схемы замещения трансформатора с двумя расщепленными и одной расщепленной обмотками.

из первичной обмотки во вторичную. В случае неодинаковой нагрузки цепей расщепленной обмотки "небалансная" работа трансформатора может быть представлена, как результат наложения сквозной мощности  $I_c$  и уравнительной мощ-

ности  $I_y$ , передаваемой из одной цепи в другую цепь расщепленной обмотки. Величина отношения уравнительной мощности к сквозной характеризует степень небаланса. Для уменьшения потерь энергии при нормальной работе трансформатора цепи расщепленной обмотки следует загружать равномерно или с небольшим небалансом.

Случай одинаковых нагрузок цепей 2 и 2' аналогичен параллельному соединению этих цепей. Трансформатор ничем не будет отличаться от обычного двухобмоточного трансформатора и в расчетах может быть представлен реактивностью трансформатора  $x_{1-1}$  (рис. 1,б), которую назовем сквозной реактивностью.

В целях эффективного ограничения токов к. з. желательно иметь высокую реактивность между цепями расщепленной обмотки. Эта реактивность будет ниже называться реактивностью расщепления  $x_{2-2'}$ .

В общем случае при раздельной работе цепей 2 и 2' рассматриваемый трансформатор является

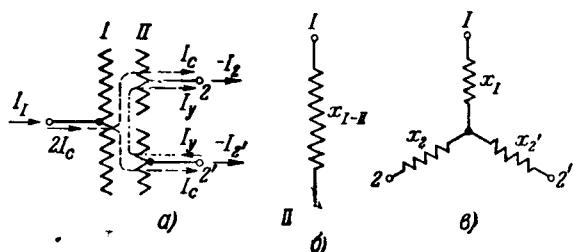


Рис. 1.

трехобмоточным, в результате чего схемой замещения для него может служить трехлучевая звезда (рис. 1, б).

Реактивности этой схемы могут быть определены по реактивностям к. з.  $x_{1-2}$ ,  $x_{1-2'}$  и  $x_{2-2'}$ :

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{x_{1-2} + x_{1-2'} - x_{2-2'}}{2}; \\ x_2 &= \frac{x_{1-2} + x_{2-2'} - x_{1-2'}}{2}; \\ x_{2'} &= \frac{x_{1-2'} + x_{2-2'} - x_{1-2}}{2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Если цепи расщепленной обмотки имеют тождественные реактивные характеристики относительно нерасщепленной обмотки, то будут равны одноцепные реактивности  $x_{1-2} = x_{1-2'}$ , т. е. реактивности между нерасщепленной обмоткой I и каждой цепью расщепленной обмотки. При этом:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= x_{1-2} - \frac{x_{2-2'}}{2}; \\ x_2 &= x_{2'} = \frac{x_{2-2'}}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Сопоставляя схемы рис. 1, б и рис. 1, в, можно получить следующую зависимость между реактивностями:

$$x_{1-2} = x_{1-2'} = x_{1-II} + \frac{x_{2-2'}}{4}. \quad (3)$$

Тогда из равенств (2) получим значения реактивностей лучевой схемы замещения, выраженные через сквозную реактивность и реактивность расщепления трансформатора:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_{1-II} - \frac{x_{2-2'}}{4}; \\ x_2 &= x_{2'} = \frac{x_{2-2'}}{2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Существенной характеристикой трансформатора с расщепленной обмоткой является отношение реактивности расщепления  $x_p$  к сквозной реактивности  $x_c$  — коэффициент расщепления:

$$k_p = \frac{x_p}{x_c} = \frac{x_{2-2'}}{x_{1-II}}. \quad (5)$$

Практическое применение могут чистить трансформаторы с отношением этих реактивностей в

пределах от 4 до 10. Более высокая величина этого отношения желательна в целях ограничения токов к. з. при повреждении на одной из цепей расщепленной обмотки, особенно при наличии источника питания на другой цепи. Однако, тем больше при той же сквозной реактивности будут одноцепные реактивности. Это может привести к значительным потерям напряжения и реактивной мощности при неодинаковой загрузке цепей расщепленной обмотки. Следовательно, желание иметь значительную реактивность расщепления в целях ограничения токов к. з. противоречит требованиям нормального режима работы при возможном значительном небалансе нагрузок. Поэтому выбор реактивностей для трансформатора с расщепленной обмоткой следует производить в зависимости от условий работы системы, в которой трансформатор будет установлен.

Вполне удовлетворительные характеристики работы трансформатора с расщепленной обмоткой получаются при  $k_p = 4$ . При этом ток к. з. на стороне расщепленной обмотки уменьшается в 1,5—2 раза. Выполнение таких трансформаторов не вызывает каких-либо значительных конструктивных осложнений.

Одним из способов расщепления является разделение параллельных ветвей соответствующей обмотки трансформатора на независимые цепи. Такой трансформатор с одной расщепленной обмоткой, полученный из обычного однофазного двухобмоточного трансформатора, показан на рис. 2, а. Цепи обмотки I, расположенные на разных стержнях, соединены параллельно, а цепи обмотки II выведены отдельно, чем и создается расщепление этой обмотки на две цепи 2 и 2'. Реактивность расщепления между этими цепями определяется суммой реактивностей между обмотками I и 2' и 2 на каждом стержне:

$$x_{2-2'} = x_{1-2} + x_{1-2'} = 4x_{1-II}. \quad (6)$$

С достаточной точностью для практических расчетов схему замещения такого трансформатора можно также представить в виде трехлучевой звезды (рис. 2, б), если пренебречь токами намагничивания и рассматривать две параллельно включенные цепи нерасщепленной обмотки, расположенные на разных сердечниках, как одну общую обмотку.

Согласно выражениям (4) при  $k_p = 4$  имеем:

$$x_1 = 0; x_2 = x_{2'} = 2x_{1-II}. \quad (7)$$

При данной конструкции трансформатора следует учитывать, что связь между цепями рас-

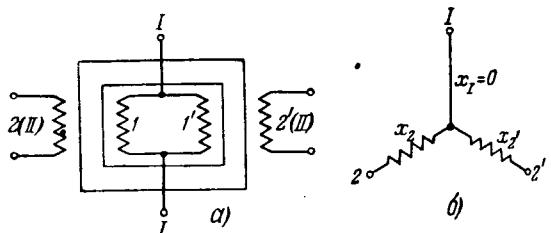


Рис. 2.

щепленной обмотки осуществляется только через параллельные ветви другой обмотки, а потому при небалансе нагрузок в расщепленной обмотке являются циркулирующие токи в нерасщепленной обмотке, вызывающие дополнительные потери энергии в трансформаторе.

Часто бывает целесообразно выполнить трансформатор с двумя нерасщепленными и одной расщепленной на две цепи обмотками, как показано на рис. 3. Обмотка II полагается расщепленной на две цепи 2 и 2'. Подобный трансформатор уже не может быть представлен эквивалентной схемой в виде чистой лучевой звезды, так как он является по существу четырехобмоточным трансформатором.

В общем случае эквивалентная схема  $n$ -обмоточного трансформатора может быть представлена в виде  $n$ -угольника с диагоналями [Л. 2]. Однако, пользование этими схемами достаточно сложно и поэтому для практических расчетов могут быть предложены более удобные эквивалентные схемы. На рис. 3 показана схема заме-

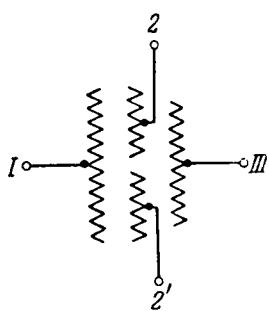


Рис. 3.

ния четырехобмоточного трансформатора [Л. 3]. Схема удовлетворяет требованиям к эквивалентным схемам трансформаторов, если преобречь токами намагничивания. Она имеет четыре точки входа соответственно четырем обмоткам трансформатора и содержит шесть независимых звеньев соответственно шести независимым реактивностям к. з. между различными парами обмоток I, 2, 2' и III (всего в данной схеме восемь звеньев, вследствие чего внутренние противоположные звенья приравнены друг другу).

Чтобы определить реактивности эквивалентной схемы по реактивностям к. з. трансформатора, воспользуемся рис. 4, согласно которому можно написать:

$$\left. \begin{aligned} x_{1-2} &= a + b + \frac{(2e+f)f}{2(e+f)}; & x_{1-III} &= a + c + \frac{e+f}{2}; \\ x_{1-2'} &= a + d + \frac{(2f+e)e}{2(e+f)}; & x_{2-III} &= b + c + \frac{(2f+e)e}{2(e+f)} \\ x_{2-2'} &= b + d + \frac{e+f}{2}; & x_{III-2'} &= c + d + \frac{(2e+f)f}{2(e+f)}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

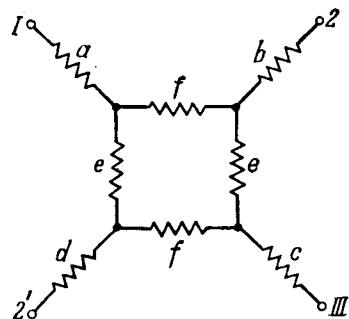


Рис. 4.

Вводя обозначения

$$\left. \begin{aligned} x_{1-III} + x_{2-2'} - x_{1-2} - x_{III-2'} &= X_1, \\ x_{1-III} + x_{2-2'} - x_{1-2'} - x_{III-2} &= X_2, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

и решая совместно уравнения (8), получим для реактивностей схемы:

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{x_{1-2} + x_{1-2'} - x_{2-2'}}{2} - \frac{\sqrt{X_1 X_2}}{2}, \\ b &= \frac{x_{1-2} + x_{2-III} - x_{1-III}}{2} - \frac{\sqrt{X_1 X_2}}{2}, \\ c &= \frac{x_{2-III} + x_{III-2'} - x_{2-2'}}{2} - \frac{\sqrt{X_1 X_2}}{2}, \\ d &= \frac{x_{1-2'} + x_{III-2'} - x_{1-III}}{2} - \frac{\sqrt{X_1 X_2}}{2}, \\ e &= \sqrt{X_1 X_2} + X_1; \\ f &= \sqrt{X_1 X_2} + X_2. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Применим полученную эквивалентную схему четырехобмоточного трансформатора к рассматриваемому трансформатору (рис. 3). Вследствие симметрии цепей 2 и 2' расщепленной обмотки относительно нерасщепленных обмоток I и III из шести реактивностей к. з. различаются между собой только четыре, так как  $x_{1-2} = x_{1-2'}$  и  $x_{III-2} = x_{III-2'}$ . Тогда на основании выражений (10) в данном случае получим следующие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{2x_{1-1} - x_{2-2'}}{2} - \frac{X}{2}, \\ b = d &= \frac{x_{1-2} + x_{III-2} - x_{1-III}}{2} - \frac{X}{2}, \\ c &= \frac{2x_{III-2} - x_{2-2'}}{2} - \frac{X}{2}, \\ e = f &= 2X, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где

$$X = x_{1-III} + x_{2-2'} - x_{1-2} - x_{III-2}.$$

Однако, вместо этой достаточно сложной схемы для трансформатора с двумя нерасщепленными и одной расщепленной на две цепи обмотки можно предложить иную, более удобную для практического пользования схему замещения, представленную на рис. 5.

Схема удовлетворяет вышеуказанным требованиям, иначе говоря, имеет четыре точки

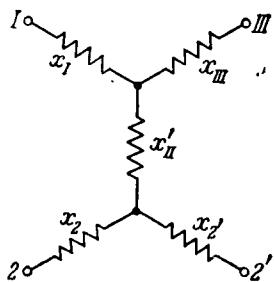


Рис. 5.

входа и пять ветвей, из которых четыре различаются между собой. Реактивности этой схемы определяются непосредственно по реактивностям к. з. и реактивности расщепления:

$$\left. \begin{aligned} x_I &= \frac{x_{I-II} + x_{I-III} - x_{II-III}}{2}; \\ x_{III} &= \frac{x_{I-III} + x_{II-III} - x_{I-II}}{2}; \\ x'_{II} &= \frac{x_{I-II} + x_{II-III} - x_{I-III}}{2} - \frac{x_{2-2'}}{4}; \\ x_2 &= x_{2'} = \frac{x_{2-2'}}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Эти формулы вытекают из сравнения реактивностей между зажимами эквивалентной схемы с соответствующими реактивностями к. з. трансформатора.

Для обычного трехобмоточного трансформатора указываются реактивности к. з. между каждой парой обмоток  $x_{I-II}$ ,  $x_{I-III}$  и  $x_{II-III}$ . Поэтому при расщеплении одной из обмоток трансформатора удобно выразить все ветви схемы замещения через эти реактивности и реактивность расщепления  $x_p$ . В общем случае величина реактивности расщепления может иметь различные значения, зависящие от конструктивного выполнения трансформатора. Зависимости между сквозными, одноцепными реактивностями и реактивностью расщепления определяются уравнениями, аналогичными (3):

$$\left. \begin{aligned} x_{I-2} &= x_{I-II} + \frac{x_{2-2'}}{4}; \\ x_{III-2} &= x_{II-III} + \frac{x_{2-2'}}{4}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

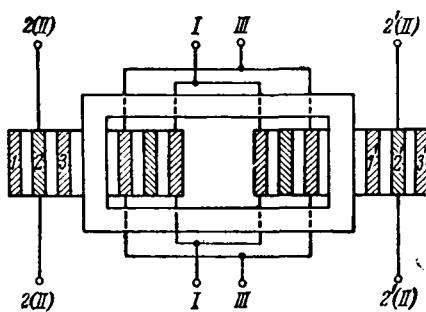


Рис. 6.

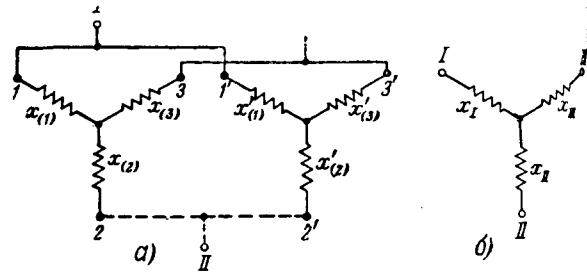


Рис. 7.

Если обмотка трансформатора расщеплена так, как показано на рис. 6, то величина реактивности расщепления определяется реактивностями к. з. между обмотками. При данной конструкции трансформатора потокосцеплениями (посредством потоков рассеяния) между группами обмоток, расположенных на разных стержнях, можно пренебречь и для каждой группы обмоток независимо могут быть составлены схемы замещения, как показано на рис. 7, а.

Реактивности этих схем определяются формулам трехобмоточных трансформаторов:

$$\left. \begin{aligned} x_{(1)} &= x'_{(1)} = \frac{x_{1-2} + x_{1-3} - x_{2-3}}{2}; \\ x_{(2)} &= x'_{(2)} = \frac{x_{1-2} + x_{2-3} - x_{1-3}}{2}; \\ x_{(3)} &= x'_{(3)} = \frac{x_{1-3} + x_{2-3} - x_{1-2}}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Если обмотки одинакового напряжения, расположенные на разных стержнях, объединены параллельно, то трехобмоточный трансформатор представляется схемой (рис. 7, б) с реактивностями  $x_I$ ,  $x_{II}$  и  $x_{III}$ , которые определяются по аналогичным формулам (14) через реактивности к. з.  $x_{I-II}$ ,  $x_{I-III}$  и  $x_{II-III}$ .

Для реактивности  $x_{2-2'}$ , согласно рис. 7, б имеем

$$x_{2-2'} = 2x_2 + 2 \frac{x_1 x_3}{x_1 + x_3}. \quad (15)$$

Учитывая, что реактивности  $x_{I-II}$ ,  $x_{I-III}$  и  $x_{II-III}$  в два раза меньше соответствующих реактивностей  $x_{1-2}$ ,  $x_{1-3}$  и  $x_{2-3}$ , получим:

$$x_{2-2'} = 4x_{II} + 4 \frac{x_1 x_{III}}{x_1 + x_{III}}. \quad (16)$$

При концентрических обмотках приближен можно считать, что

$$x_{I-III} \approx x_{I-II} + x_{II-III}. \quad (17)$$

Тогда для реактивности расщепления получим

$$x_p = x_{2-2'} = 4 \frac{x_{I-II} x_{II-III}}{x_{I-II} + x_{II-III}}, \quad (18)$$

При расщеплении крайних обмоток (*I* или *III* по рис. 6) соотношения (13), (15) и (16) остаются справедливыми при соответствующей перемене индексов.

Принимая приближенное соотношение (17), реактивность расщепления для этих случаев соответственно будет:

$$x_p = 4x_{I-II} \text{ или } x_p = 4x_{II-III}. \quad (19)$$

Зная величину реактивности расщепления и пользуясь формулами (11) или (12), можно определить все реактивности схем замещения, согласно рис. 4 или 5.

Составление последней схемы замещения и особенно расчеты, производимые при определении токов к. з. в схемах с трансформаторами расщепленными обмотками, значительно упрощаются по сравнению с общей эквивалентной схемой четырехобмоточного трансформатора.

Если требуется учесть активные сопротивления, то в вышеприведенных схемах замещения следует добавить в ветви, отходящие от якорей (например, в ветви *a*, *b*, *c*, *d* схемы рис. 4), активные сопротивления соответствующих обмоток.

**Пример.** Для иллюстрации рассмотрим пример на составление схемы замещения для однофазного трехобмоточного трансформатора в случае расщепления обмотки якорного напряжения на две цепи. Пусть трансформатор имеет следующие реактивности к. з. между обмотками: 220 кв — 110 кв — 20%; 220 кв — 6 кв — 13%; 110 кв — 6 кв — 7%.

По значениям реактивностей видно, что обмотка кв расположена между двумя другими обмотками, потому согласно рис. 6 обозначим: обмотка 220 кв — *I*; 110 кв — *III*.

Следовательно, реактивности к. з. трансформатора будут:

$$x_{I-II} = 13\%; \quad x_{I-III} = 20\%; \quad x_{II-III} = 7\%.$$

Обмотка *II* расщеплена на две цепи — 2 и 2'. Реактивность расщепления найдем по формуле (18):

$$x_{2-2'} = 4 \frac{13 \cdot 7}{13 + 7} = 18,2\%,$$

Составим сначала схему замещения по рис. 4. Соотношения (13) дают:

$$x_{I-II} = 13 + \frac{18,2}{4} = 17,55\%,$$

$$x_{II-III} = 7 + \frac{18,2}{4} = 11,55\%.$$

Затем по формулам (11) определим:

$$X = 20 + 18,2 - 17,55 - 11,55 = 9,1\%,$$

$$a = \frac{2 \cdot 17,55 - 18,2}{2} - \frac{9,1}{2} = 3,9\%,$$

$$b = d = \frac{17,55 + 11,55 - 20}{2} - \frac{9,1}{2} = 0;$$

$$c = \frac{2 \cdot 11,55 - 18,2}{2} - \frac{9,1}{2} = -2,1\%;$$

$$e = f = 2 \cdot 9,1 = 18,2\%.$$

Для составления эквивалентной схемы, соответствующей рис. 5, воспользуемся формулами (12):

$$x_I = \frac{13 + 20 - 7}{2} = 13\%;$$

$$x_{III} = \frac{20 + 7 - 13}{2} = 7\%;$$

$$x'_{II} = \frac{13 + 7 - 20}{2} - \frac{18,2}{4} = -4,55\%;$$

$$x_2 = x_{2'} = \frac{18,2}{2} = 9,1\%.$$

Дальнейшие преобразования этой схемы при аналитических расчетах значительно проще, чем первой схемы.

#### Литература

1. Л. И. Двоскин. Схемы коммутации и конструкции в электрической части основных положений по проектированию тепловых электрических станций. Электрические станции, № 6, 1947.

2. Г. Н. Петров. Трансформаторы. Т. I, Энергоиздат, 1934.

3. F. M. Starr. An Equivalent Circuit for Four-Winding Transformer. GER, № 3, 1933.

[28. 3. 1949]



# Последовательный конденсатор во вторичной цепи магнето

Кандидат техн. наук В. А. БАЛАГУРОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

Включение последовательного конденсатора во вторичную цепь магнето является одним из методов уменьшения времени разряда [Л. 1]. В статье приводятся некоторые исследования по определению влияния последовательного конденсатора на разрядные процессы и на величину вторичных напряжений. Рассматривается протекание процесса индуктивного разряда для этого случая (рис. 1).

При индуктивном разряде ток вынужден проходить через конденсатор, заряжая его. Определим закон его изменения. В момент времени  $t=0$ , когда произошел емкостный разряд, совершающийся в очень короткий промежуток времени, имеем начальные условия: первичный ток  $i_1=i_{10}$ ; вторичный  $i_2=i_{20}$ ; напряжение на последовательном конденсаторе  $U_{n.k}=U_0$ . Величина и знак  $U_0$  зависят от условий и длительности протекания предыдущего разряда.

За время разряда на основном искровом промежутке и искровом промежутке распределителя имеем почти неизменные напряжения  $U_p'$  и  $U_p''$ , так как разряд происходит на устойчивой части вольтамперной характеристики, соответствую-

При высоких скоростях вращения магнето, предназначенных для многоцилиндровых двигателей, разрядные процессы часто нарушают нормальную работу системы зажигания. Одним из методов уменьшения времени разряда является включение последовательного конденсатора во вторичную цепь магнето. Исследуется аналитически и экспериментально рабочий процесс в магнето для этого случая. Выведены формулы для подсчета необходимой емкости последовательного конденсатора и определена область его применения. Даны формулы для подсчета вторичных напряжений.

щей тлеющему разряду [Л. 1]. В силу этого величины  $C_2$  и  $R_w$  почти не влияют на протекание разрядного процесса.

Величина разрядного напряжения определится выражением:

$$U_p = U_p' + U_p'' = U_k' + E'\delta' + U_k'' + E''\delta''.$$

где  $U_k'$  и  $U_k''$  — катодные падения напряжения на искровых промежутках;  $E'$  и  $E''$  — напряженности электрических полей в положительном столбе  $\delta'$  и  $\delta''$  — величины искровых промежутков.

Составим операторные уравнения для обоих контуров:

$$L_1 p(i_1 - i_{10}) + i_1 R_1 + \left( \frac{i_1}{C_1 p} + U_{10} \right) + M p(i_2 - i_{20}) = 0 \quad (1)$$

$$L_2 p(i_2 - i_{20}) + i_2 R_{20} + \left( \frac{i_2}{C_{n.k} p} \pm U_0 \right) + M p(i_1 - i_{10}) + U_p = 0. \quad (2)$$

Решение операторных уравнений (1) и (2) после некоторых упрощений дает выражение для вторичного тока:

$$i_2(t) = \sqrt{B_1^2 + B_2^2} e^{-k_1 t} \cos(\omega_1 t + \delta_1) + \sqrt{B_3^2 + B_4^2} e^{-k_2 t} \cos(\omega_2 t + \delta_2), \quad (3)$$

где:

$$B_1 = \frac{\left[ \frac{1}{L_1 C_1} i_{20} + \frac{M}{L_1 C_1 L_2} i_{10} \right] \omega_1 - (1 - k^2) i_{20} \omega_1^3}{\omega_1 \left[ \left( \frac{1}{L_1 C_1} + \frac{1}{L_2 C_{n.k}} \right) - 2(1 - k^2) \omega_1^2 \right]};$$

$$B_2 = \frac{\left( \frac{M}{L_1 L_2} U_{10} - \frac{\pm U_0 + U_p}{L_2} \right) \omega_1^2 + \frac{\pm U_0 + U_p}{L_1 L_2 C_1}}{\omega_1 \left[ \left( \frac{1}{L_1 C_1} + \frac{1}{L_2 C_{n.k}} \right) - 2(1 - k^2) \omega_1^2 \right]};$$

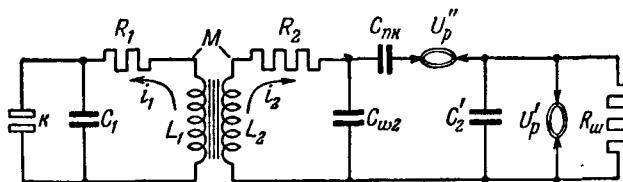


Рис. 1. Схема замещения магнето с последовательным конденсатором во вторичной цепи.

$K$ —контакты;  $L_1$  и  $L_2$ —индуктивности первичной и вторичной обмоток;  $R_1$  и  $R_2$ —эффективные сопротивления первичной и вторичной обмоток;  $C_1$ —емкость первичного конденсатора;  $C_{w2}$ —емкость вторичной обмотки трансформатора;  $C_{n.k}$ —емкость последовательного конденсатора;  $C_2'$ —эквивалентная емкость вторичной цепи;  $R_w$ —шунтирующее сопротивление;  $M$ —взаимоиндуктивность.

$$B_3 = \frac{\left[ \frac{1}{L_1 C_1} i_{20} + \frac{M}{L_1 C_1 L_3} i_{10} \right] \omega_2 - (1 - k^2) i_{20} \omega_2^3}{\omega_2 \left[ \left( \frac{1}{L_1 C_1} + \frac{1}{L_2 C_{n,\kappa}} \right) - 2(1 - k^2) \omega_2^2 \right]};$$

$$B_4 = \frac{\frac{M}{L_1 L_3} U_{10} - \frac{\pm U_0 + U_p}{L_3} \omega_2^2 + \frac{\pm U_0 + U_p}{L_1 L_2 C_1}}{\omega_2 \left[ \left( \frac{1}{L_1 C_1} + \frac{1}{L_2 C_{n,\kappa}} \right) - 2(1 - k^2) \omega_2^2 \right]}.$$

$\omega_1$  и  $\omega_2$ —угловые частоты, определяемые с достаточной точностью выражением:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{\left( \frac{1}{L_1 C_1} + \frac{1}{L_2 C_{n,\kappa}} \right) \mp \sqrt{\left( \frac{1}{L_1 C_1} + \frac{1}{L_2 C_{n,\kappa}} \right)^2 - 4 \frac{1 - k^2}{L_1 C_1 L_2 C_{n,\kappa}}}}{2(1 - k^2)}}. \quad (4)$$

Низкую и высокую частоту можно определить еще по более простым формулам:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{1}{L_1 C_1 + L_2 C_{n,\kappa}}}; \quad (5)$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{L_1 C_1 + L_2 C_{n,\kappa}}{L_1 C_1 L_2 C_{n,\kappa}(1 - k^2)}}, \quad (6)$$

$k_1$  и  $k_2$ —коэффициенты затухания,

$\delta_1 = \arctg \frac{B_3}{B_1}$  и  $\delta_2 = \arctg \frac{B_4}{B_3}$ —фазные углы,

$\frac{M}{V L_1 L_3}$ —коэффициент связи между обмотками.

Если пробой искрового промежутка происходит задолго до максимума напряжения, то выражение (3) может быть упрощено:

$$i_R(t) = \frac{C_{n,\kappa}}{L_1 C_1 + L_2 C_{n,\kappa}} \sqrt{(M I_0)^2 + \frac{(U_0 - U_p)^2}{\omega_1^2}} \times \cos(\omega_1 t + \delta_1) e^{-k_1 t} - \frac{M I_0}{L_3} e^{-k_2 t} \cos(\omega_2 t + \delta_2), \quad (7)$$

где  $I_0$ —ток разрыва в первичной цепи.

Из уравнений (3) и (7) видим, что вторичный разрядный ток при включенном последовательном конденсаторе изменяется по закону суммы двух затухающих косинусоид: низкочастотной угловой частотой  $\omega_1$  и высокочастотной быстро затухающей косинусоиды с угловой частотой  $\omega_2$ . Косинусоиды имеют разные амплитуды и коэффициенты затухания. Следовательно, имеет место колебательный процесс в отличие от периодического, когда последовательный конденсатор не был включен ( $C_{n,\kappa} = \infty$ ).

На рис. 2 приведены осциллограммы разрядного тока при  $C_{n,\kappa} = 5000 \text{ мкмкФ}$  (верхняя осциллограмма) и при  $C_{n,\kappa} = \infty$  (нижняя осциллограмма), подтверждающие сделанные выводы. Осциллограммы показали, что разрядный процесс в искровом промежутке прекращается при переходе тока через нуль. Отрицательной полуволны разрядного тока не наблюдалось. Таким образом, время разряда определяется выражением:

$$t_p = \frac{\pi(90^\circ + \delta_1)}{180 \cdot \omega_1}, \quad (8)$$

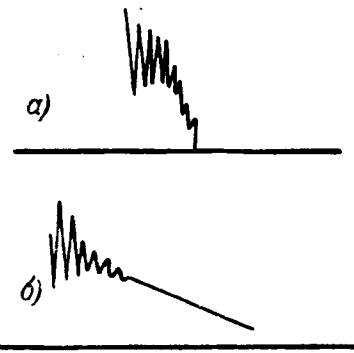


Рис. 2. Осциллограммы разрядного тока.  
а—при  $C_{n,\kappa} = 5000 \text{ мкмкФ}$ ; б—при  $C_{n,\kappa} = \infty$ .

где  $\delta_1$ —фазный угол, зависящий в основном от величины напряжения  $U_0$  на последовательном конденсаторе в момент начала разряда. При нормальной работе магнето  $\delta_1$  обычно может достигать  $15 \div 20^\circ$ .

Для нормальной работы необходимо выполнить соотношение:

$$t_p \leq t_{p,\kappa} = \frac{\alpha_{p,\kappa}}{\alpha_{p,\kappa} + \alpha_{z,\kappa}} \cdot \frac{2 \cdot 60}{n_{m,\partial} Z} = \frac{\alpha_{p,\kappa}}{6 n_m},$$

где  $t_{p,\kappa}$ —время разомкнутого состояния контактов;

$n_{m,\partial}$ —максимальная скорость двигателя в об/мин;

$n_m$ —максимальная скорость магнето по валику ротора в об/мин;

$Z$ —число цилиндров двигателя;

$\alpha_{p,\kappa}$  и  $\alpha_{z,\kappa}$ —углы замкнутого и разомкнутого состояния контактов по валику ротора.

Приравнивая эти величины и давая их развернутые выражения, можем подсчитать наибольшую величину емкости конденсатора, при которой разрядный процесс укладывается за время разомкнутого состояния контактов:

$$C_{n,\kappa} = \frac{1 - L_1 C_1 \left[ \frac{n_m \pi (90^\circ + \delta_1)}{30 \cdot \alpha_{p,\kappa}} \right]^2}{L_3 \left[ \frac{n_m \pi (90^\circ + \delta_1)}{30 \cdot \alpha_{p,\kappa}} \right]^2 - L_1 C_1 L_3 (1 - k^2) \cdot \left[ \frac{n_m \pi (90^\circ + \delta_1)}{30 \cdot \alpha_{p,\kappa}} \right]^4}. \quad (9)$$

Выражение упрощается, если пренебречь незначительными по величине вторыми членами числителя и знаменателя:

$$C_{n,\kappa} = \frac{1}{L_3 \left[ \frac{\pi (90^\circ + \delta_1)}{30 \cdot \alpha_{p,\kappa}} \cdot \frac{n_m}{\alpha_{p,\kappa}} \right]^2} = \frac{\frac{t_p^2}{\alpha_{p,\kappa}}}{L_3 \left[ \frac{\pi (90^\circ + \delta_1)}{180} \right]^2}. \quad (10)$$

Для магнето, устанавливаемых на многоцилиндровых скоростных двигателях, необходимая величина емкости конденсатора, определенная из условий ограничения разряда, может получиться незначительной, что приводит к сильному

уменьшению напряжения на искровом промежутке. Включение последовательного конденсатора становится нецелесообразным. Поэтому необходимо рассмотреть вопрос влияния последовательного конденсатора на вторичные напряжения, когда нет пробоя искрового промежутка.

Упрощенная электрическая схема замещения была приведена на рис. 1. Определим вначале вторичные напряжения для случая, когда величина шунтирующего сопротивления  $R_u = \infty$  (чистые свечи). Решение схемы замещения на рис. 1 операторным методом приводит к следующему выражению для результирующего вторичного напряжения в функции времени:

$$U_2(t) = \frac{MI_0}{\sqrt{(L_1C_1 - L_2C_2)^2 + 4k^2L_1C_1L_2C_2}} \times \\ \times \left\{ \frac{e^{-k_1 t} \sin \omega_1 t}{\omega_1} - \frac{e^{-k_2 t} \sin \omega_2 t}{\omega_2} \right\}, \quad (11)$$

где

$I_0$  — ток разрыва в первичной цепи;

$C_2 = C_{w2} + \frac{C_{n.k} \cdot C'_2}{C_{n.k} + C'_2}$  — результирующая емкость вторичной цепи;

$\omega_1$  и  $\omega_2$  — низкая и высокая угловые частоты.

Величины  $\omega_1$  и  $\omega_2$  определяются по формулам (4), (5) и (6), в которых величину  $C_{n.k}$  необходимо заменить величиной  $C_2$ .

Коэффициенты затухания  $k_1$  и  $k_2$  сильно зависят от эффективных значений  $R_1$  и  $R_2$ . Осциллограммы показали, что обычно  $k_1 \geq 1500$  сек. $^{-1}$ , а  $k_2 \sim 30000$  сек. $^{-1}$ . Коэффициенты затухания могут быть подсчитаны и аналитически [Л. 3].

Из формулы (11) видно, что во вторичной цепи имеет место колебательный процесс в виде накладывающихся друг на друга затухающих синусоид с разными частотами, амплитудами и коэффициентами затухания. Амплитуды синусоид обратно пропорциональны их частотам. Напряжение на искровом промежутке будет меньше результирующего за счет падения напряжения в последовательном конденсаторе и определится выражением:

$$U'_2(t) = \frac{C_{n.k}}{C_{n.k} + C'_2} \cdot \frac{MI_0}{\sqrt{(L_1C_1 - L_2C_2)^2 + 4k^2L_1C_1L_2C_2}} \times \\ \times \left\{ \frac{e^{-k_1 t} \sin \omega_1 t}{\omega_1} - \frac{e^{-k_2 t} \sin \omega_2 t}{\omega_2} \right\}. \quad (12)$$

Напряжения распределяются обратно пропорционально емкостям. Пренебрегая незначительной высокочастотной составляющей, можем найти максимальную величину напряжения на искровом промежутке:

$$U'_{2.m} = \frac{C_{n.k}}{C_{n.k} + C'_2} \times \\ \times \frac{MI_0 e^{-k_1 t}}{\sqrt{(L_1C_1 - L_2C_2)^2 + 4k^2L_1C_1L_2C_2} \sqrt{\omega_1^2 + k_1^2}}. \quad (13)$$

При высоких скоростях вращения становится заметной э. д. с. вращения, положительная по знаку, почти не зависящая от тока разрыва.

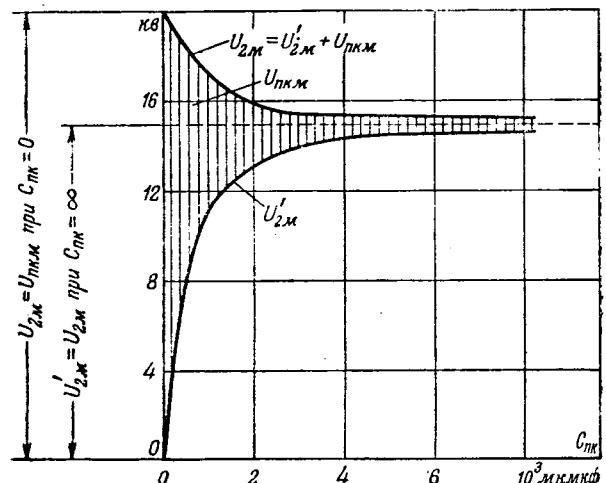


Рис. 3. Максимальные напряжения во вторичной цепи магнето в зависимости от емкости конденсатора при  $R_u = \infty$ .

Вторичное напряжение на искровом промежутке понижается с уменьшением величины емкости последовательного конденсатора, т.к. емкости  $C_{n.k}$  и  $C'_2$  соединены последовательно. Результирующее же напряжение, наоборот, возрастает, поскольку уменьшается результирующая емкость вторичной цепи. На рис. 3 приведены расчетные кривые максимальных напряжений в зависимости от  $C_{n.k}$  для системы с длиной экранированных проводов 250 см. Кривые  $U_{2.m}$  и  $U'_{2.m}$  построены согласно выше приведенным формулам. Напряжение на последовательном конденсаторе определяется как разность  $U_{n.k.m} = U_{2.m} - U'_{2.m}$  и величина его изменяется ординатами заштрихованной части. Максимальное напряжение на основном промежутке особенно сильно падает при малой  $C_{n.k} < 2000$  мкмкф.

Разберем случай, когда имеют место утечки тока по свече ( $R_u$  имеет конечное значение). Составляем дифференциальные уравнения для первичного и вторичного контуров, пренебрегая значением  $C_{w2}$ , что допустимо при большой длине экранированных проводов:

$$L_1 p(i_1 - I_0) + i_1 R_1 + \frac{1}{C_1 p} i_1 + M p i_3 = 0. \quad (14)$$

$$L_2 p i_2 + i_2 R_2 + \frac{1}{C_{n.k} p} i_2 + \frac{R_u}{1 + R_u C_2 p} i_2 + \\ + M p (i_1 - I_0) = 0. \quad (15)$$

Общее решение уравнений (14) и (15) в функции времени дает выражение для напряжения на искровом промежутке:

$$U'_2(t) = A_1 e^{-k_1 t} \sin(\omega_1 t + \delta_1) + \\ + A_2 e^{-k_2 t} \sin(\omega_2 t + \delta_2) + A_3 e^{-k_3 t}, \quad (16)$$

где  $A_1$ ,  $A_2$  и  $A_3$  — коэффициенты, определяемые при решении операторных уравнений;

$\delta_1$  и  $\delta_2$  — фазные углы;  
 $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  — коэффициенты затухания.

Из уравнения (16) видно, что волна вторичного напряжения состоит из трех составляющих: двух колебательных и одной экспоненциальной, определенной наличием  $R_{us}$ . Характерным для этой схемы является тот факт, что независимо от величины  $R_{us}$  процесс будет колебательный вследствие включенного последовательного конденсатора.

Решение уравнений (14) и (15) упрощается, если положить  $k=1$  (обычно  $k=0,9 \div 0,96$ ):

$$U'_2(t) = \frac{MI_0}{L_1 C_1 L_2 C_2} \sum p_k e^{p_k t} = \\ = B_1 e^{-k_1 t} \sin(\omega_1 t + \delta_1) + B_2 e^{-k_2 t}. \quad (17)$$

Сопряженные комплексные корни  $p_{1,2} = -k_1 \pm j\omega_1$  характеристического уравнения определяются в аналитической форме из квадратного уравнения:

$$(L_1 C_1' R_{us} + L_1 C_1 C_{n,k} R_{us} + L_2 C_2' C_{n,k} R_{us}) p^2 + \\ + \frac{L_2 C_2^2}{C_{n,k} + C_2} p + \frac{(C_{n,k} + C_2)^2 R_{us}^2 - L_2 C_2^2}{(C_{n,k} + C_2)^2 R_{us}} = 0.$$

Действительный корень определяется выражением:

$$p_3 = -k_3 \approx \frac{1}{R_{us} (C_{n,k} + C_2)}; \\ N'(p_k) = 3 \left( \frac{1}{L_2 C_{n,k}} + \frac{1}{L_2 C_2} + \frac{1}{L_1 C_1} \right) p_k^2 + \\ + 2 \left( \frac{1}{L_2 C_{n,k} R_{us} C_2} + \frac{1}{L_1 C_1 R_{us} C_2} \right) p_k + \\ + \left( \frac{1}{L_1 C_1 L_2 C_{n,k}} + \frac{1}{L_1 C_1 L_2 C_2} \right).$$

Аналогично для напряжения на последовательном конденсаторе получим:

$$U_{n,k} = \frac{MI_0}{R_{us} L_1 C_1 L_2 C_2 C_{n,k}} \sum \frac{1 + R_{us} C_2 p_k}{N'(p_k)} e^{p_k t}. \quad (18)$$

Делая некоторые упрощения, получим для напряжения на разрядном промежутке при  $R_{us} \gg 250\,000 \text{ ом}$ :

$$U'_3(t) = \frac{MI_0 C_{n,k}}{C_{n,k} + C_2} \times \\ \times \left\{ e^{-k_1 t} \sin(\omega_1 t + \delta_1) - \frac{t}{R_{us} (C_{n,k} + C_2)} \right\}. \quad (19)$$

Фазный угол  $\delta_1$  положителен и определяется выражением:

$$\delta_1 = \arcsin \frac{(L_1 C_1 + L_2 C_2) \omega_1}{R_{us} (C_{n,k} + C_2)}.$$

В результате сделанного допущения  $k=1$  мы пренебрели незначительной по величине высокочастотной составляющей вторичного напряжения.

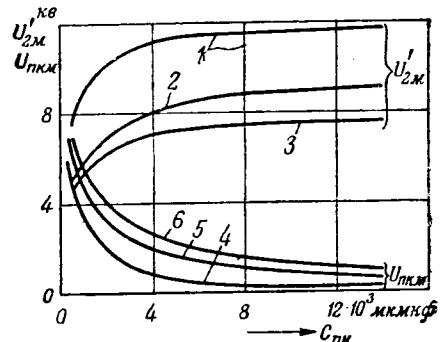


Рис. 4. Максимальные напряжения во вторичной цепи магнето в зависимости от емкости конденсатора при различных значениях  $R_{us}$ .

1, 2, 3 — максимальные напряжения на  $C_n$  при  $R_{us} = \infty$ ;  $0.5 \cdot 10^6 \text{ ом}$ ;  $0.25 \cdot 10^6 \text{ ом}$  — соответственно; 4, 5, 6 — максимальные напряжения на  $C_n$ , при  $R_{us} = \infty$ ;  $0.5 \cdot 10^6 \text{ ом}$ ;  $0.25 \cdot 10^6 \text{ ом}$  — соответственно.

Волна вторичного напряжения согласно формуле (17) состоит из низкочастотной затухающей синусоиды и отрицательной экспоненты. Закон распределения напряжения между искровым промежутком и последовательным конденсатором усложняется, что можно видеть из опытных кривых рис. 4, снятых при  $C_n = 250 \text{ см}$ . Напряжение на искровом промежутке при данной величине  $C_{n,k}$  понижается с уменьшением  $R_{us}$ , а напряжение на последовательном конденсаторе возрастает. Оно будет наибольшим при  $R_{us}=0$ , последовательный конденсатор будет емкостной нагрузкой вторичной цепи.

Разберем случай, когда  $C_{n,k}=\infty$ , что соответствует схеме без последовательного конденсатора. Вторичное напряжение определяется выражением:

$$U_2(t) = \frac{MI_0}{(L_1 C_1 + L_2 C_2) \cdot \omega_1} \cdot e^{-k_1 t} \sin \omega_1 t, \quad (20)$$

где

$$k_1 = \frac{L_2}{2 R_{us} (L_1 C_1 + L_2 C_2)};$$

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{4(L_1 C_1 + L_2 C_2) - (L_2)^2}{2(L_1 C_1 + L_2 C_2)}};$$

$$C_2 = C_2' + C_{us}.$$

Максимум вторичного напряжения

$$U_{2m} = \frac{MI_0 e^{-\frac{k_1}{\omega_1} \arctg \frac{\omega_1}{k_1}}}{(L_1 C_1 + L_2 C_2) \sqrt{\frac{\omega_1^2}{k_1^2} + 1}}. \quad (21)$$

Критическое значение  $R_{us}$ , при котором колебательный процесс переходит в апериодический ( $\omega_1=0$ ), определяется выражением:

$$R_{us} = L_2 \sqrt{\frac{1}{4(L_1 C_1 + L_2 C_2)}}.$$

В заключение следует сделать некоторые выводы.

Включение последовательного конденсатора сокращает время разряда, уменьшает количе-

ство протекшего электричества за один разряд, что снижает эрозию электродов свечей. Необходимое значение емкости можно определить аналитически.

Область применения последовательного конденсатора ограничена. Конденсатор может быть применен в магнето, устанавливаемых на двигателях с числом цилиндров не больше восемнадцати, что обусловлено большим падением напряжения. Поэтому для магнето, устанавливаемых на двигателях с числом цилиндров 18 и выше, целесообразнее включать дополнительное сопротивление во вторичную обмотку трансформатора. Необходимая величина сопротивления вторичной цепи определится выражением:

$$R_2 = \frac{L_2 \left( \frac{M}{L_2} I_0 - i_{2\kappa p} \right) - t_{p.k} \cdot U_p}{\frac{M}{L_2} I_0 \cdot t_{p.k}}, \quad (22)$$

где  $i_{2\kappa p} = 7 \div 10 \text{ mA}$  — величина разрядного тока, при котором происходит его разрыв.

Роль последовательного конденсатора при повторно-емкостном разряде, который имеет место на работающем двигателе, остается та же, что и при индуктивном разряде, но кривая тока через конденсатор носит ломаный характер.

Изложенная работа проведена под руководством проф. Б. П. Апарова.

#### Литература

1. В. А. Балагуров. Индуктивный разряд в магнето. Электричество, № 11, 1948.
2. С. Е. Баграмов и С. В. Стародубцев. Электрическое зажигание в авиационных двигателях. Ленинградская Военно-воздушная инженерная академия, 1948.
3. Тейлор-Джонс. Теория индукционной катушки ОНТИ, 1935.

[25. 4. 1949]



## Сравнение двух схем короткой сети для электропечей с прямоугольными ваннами

*Инж. Б. М. СТРУНСКИЙ*

*Севзапэнергометаллургпром*

Автором [Л. 1] были описаны две схемы короткой сети: обычно применяемая схема, в которой короткая сеть обтекается рабочим (линейным) током, и более рациональная, в которой выводы вторичных обмоток трансформатора, начала и концы фаз, доведены до электродов, где и производится их электрическое соединение по схеме треугольника. Благодаря этому короткая сеть второй схемы обтекается не линейным, но фазным током, в  $\sqrt{3}$  раза меньшим.

Схема короткой сети, обтекаемой фазным током, не нова. Она применяется приблизительно с 1935 г. на печах с круглыми ваннами, имеющими симметричное расположение электродов. Для этих печей она позволила, благодаря оструму подходу к электродам, осуществить совершенно симметричное расположение гирлянд и токоподводящих трубок, вследствие чего была практически устранена несимметрия в токоподводе фаз к электродам и печи с круглыми ваннами избавились от очень неприятного переноса энергии (явления «дикой» и «мертвой» фаз).

Несимметричное расположение электродов в прямоугольной печи не позволяет ликвидировать перенос энергии, даже если бы было возможно расположить симметрично токоподводы фаз. От несимметрии, вносимой расположением электро-

дов в ванне прямоугольной формы, избавиться невозможно; расположение электродов, в свою очередь, сказывается на расположении токоподводов

да к ним. Особенностью рациональной схемы является то, что она позволяет сблизить реактивные сопротивления токоподводов фаз и, как следствие, позволяет значительно снизить величину переносимой мощности.

Экспериментальная проверка на моделях подтвердила эти предположения.

Рис. 1 и 2 дают представление (вид в плане) о конструкции и размерах моделей. Промышленным образцом для модели обычной сети (на линейный ток) служила короткая сеть действующей печи мощностью 8250 ква с номинальным рабочим током 34 ка. Был принят модельный фактор  $1/5$ , т. е. модель повторяла линейные размеры промышленного образца, с уменьшением в 5 раз. Модели питались током нормальной частоты. Вследствие этого реактивное сопротивление сети составляло  $1/5$  от реактивного сопротивления промышленного образца.

На рис. 1 дан чертеж модели сети обычного исполнения. Сеть состоит из следующих основных участков:

1. Шихтованного пакета длиной 1,0 м.
2. Ошиновки между пакетом и гирляндами, дальнейшем именуемой «плечами».

3. Гирлянды (гибкого токоподвода).
4. Токоподвода между гирляндой и электродами.
5. Электродов.

Шихтованный пакет собран из восемнадцати медных полос  $60 \times 1,5 \text{ mm}^2$ . Полосы разных фаз между собой перешитованы в порядке следования фаз. Расстояние между полосами в пакете по оси полос 6  $\text{мм}$ . Сечение меди на фазу — 40  $\text{mm}^2$ . «Плечи» представляют собой продолжение пакета и выполнены из того же материала. Гирлянда состоит из алюминиевых лент  $26 \times 1 \text{ mm}^2$ . Общее сечение гирлянды на фазу  $4 \times 26 = 624 \text{ mm}^2$ . Ленты собраны в две ветви, которые с двух сторон подходят к электродам. Длина гирлянд разных фаз различна, что объясняется разницей в расположении плеч. Токоподвод гирлянды к электроду выполнен из медных полос  $60 \times 1,5 \text{ mm}^2$ . Длина этого участка и расположение полос одинаково для всех трех электродов. К электроду полосы прижимаются с помощью медных скоб, стягиваемых стальными болтами. Электроды графитовые диаметром 200  $\text{мм}$ . Длина рабочей части электрода 510  $\text{мм}$ , расстояние между соседними электродами 516  $\text{мм}$ . Зануление электродов выполнено с помощью стальных скоб и медных шин, соединяющих скобы между собой.

Модель рациональной сети (рис. 2) отличается от первой модели наличием трех отдельных пакетов. В каждом таком пакете полосы от начала и конца фазы трансформатора перешитованы. Длина пакетов одинакова и равна длине пакета модели 1. Расшифтовка пакетов произведена таким образом, что к каждому электроду подходит начало одной и конец другой фазы, соединяющихся под электродным зажимом. Расположение и длина участков от плеч ошиновки до нуля на электродах те же, что для модели 1, только сечение гирлянды путем прибавления нескольких лент увеличено до 390  $\text{mm}^2$  в ветви.

Обычно под короткой сетью понимают токоподвод от печного трансформатора до электродов. Описанные модели, кроме короткой сети, имеют и электроды, так что их нужно рассматривать как модели печи, в которых ванна, объединяющая все три электрода, заменена зачущающей шиной. Таким образом, в моделях в масштабе  $1/5$  была воспроизведена печная установка. Все те явления, которые имеют место в короткой сети печной установки при одинаковой нагрузке, включая влияние поля ванны на токоподвод, имели место и здесь.

**Методика исследования.** Основным электрическим параметром, характеризующим короткую сеть, является реактивное сопротивление. Мощность переноса в ваттах, как известно, выражается (при равных токах) величиной:

$$P_n = I^2 \frac{\sqrt{3}}{2} (X_{12} - X_{13}) =$$

$$= \sqrt{3} I^2 [(X_a - X_b) - (X_{11} - X_{22})].$$

Здесь  $X_a$  и  $X_b$  — действующее реактивное со-

противление токопроводов для I и II фаз короткой сети;

$X_{11}$  и  $X_{22}$  — реактивное сопротивление токопроводов фаз I и II, обязанное влиянию потоков самоиндукции этих фаз;

$X_{12}$  и  $X_{13}$  — реактивное сопротивление токопроводов фазы I, обязанное влиянию потока взаимоиндукции фаз II и III.

Величина

$$R_n = \frac{\sqrt{3}}{2} (X_{12} - X_{13}) = \sqrt{3} [(X_a - X_b) - (X_{11} - X_{22})]$$

выражает сопротивление переноса. Оно также определяется реактивным сопротивлением токопроводов фаз.

Определить перенос мощности непосредственно путем замеров не представлялось возможным потому, что мощности фаз были различны.

Фактически измерения имели целью определение: а) собственных коэффициентов самоиндукции; б) коэффициентов взаимоиндукции; в) действующих коэффициентов самоиндукции.

Эти коэффициенты определились из соотношений:

$$Z = \frac{U}{I}; \quad R = \frac{P}{I}; \quad X = \sqrt{Z^2 - R^2};$$

$$L = \frac{X}{2\pi f}; \quad M = \frac{U}{2\pi fI}.$$

Так как часто  $Z$  и  $R$  близки друг к другу, незначительные отклонения в измеряемых величинах дают большие колебания для величины  $X$ , что является недостатком данного метода измерений. Более надежно определять  $L$  из отношения

$$L = \frac{E}{2\pi fI},$$

где  $E$  — э. д. с. взаимоиндукции, наведенная в тонком изолированном проводнике, проложенном вдоль исследуемой цепи и повторяющим весь профиль цепи. При укладке такого проводника непосредственно на токопроводе цепи э. д. с. равна реактивной составляющей падения напряжения в цепи.

Опыты с однофазной нагрузкой, при которой последовательно включаются два электрода, и с трехфазной равномерной нагрузкой позволяют определить ряд действующих коэффициентов самоиндукции. Решая совместно эти уравнения, в которые входят уже известные величины собственных коэффициентов самоиндукции, можно определить коэффициенты взаимоиндукции. Последние определялись также непосредственно путем замеров э. д. с., наведенной в какой-либо цепи, отключенной от всей сети током, протекающим в другой цепи или фазе. В опытах с трехфазной нагрузкой основным условием являлось равенство токов в фазах (электродах); это равенство поддерживалось с точностью  $\pm 0,5\%$ .

**Результаты исследования.** В табл. I приведены данные, характеризующие реактивное сопротивление участков сети № 1 при равномерной трехфазной нагрузке. Ток равнялся 1 880  $\text{а}$ .

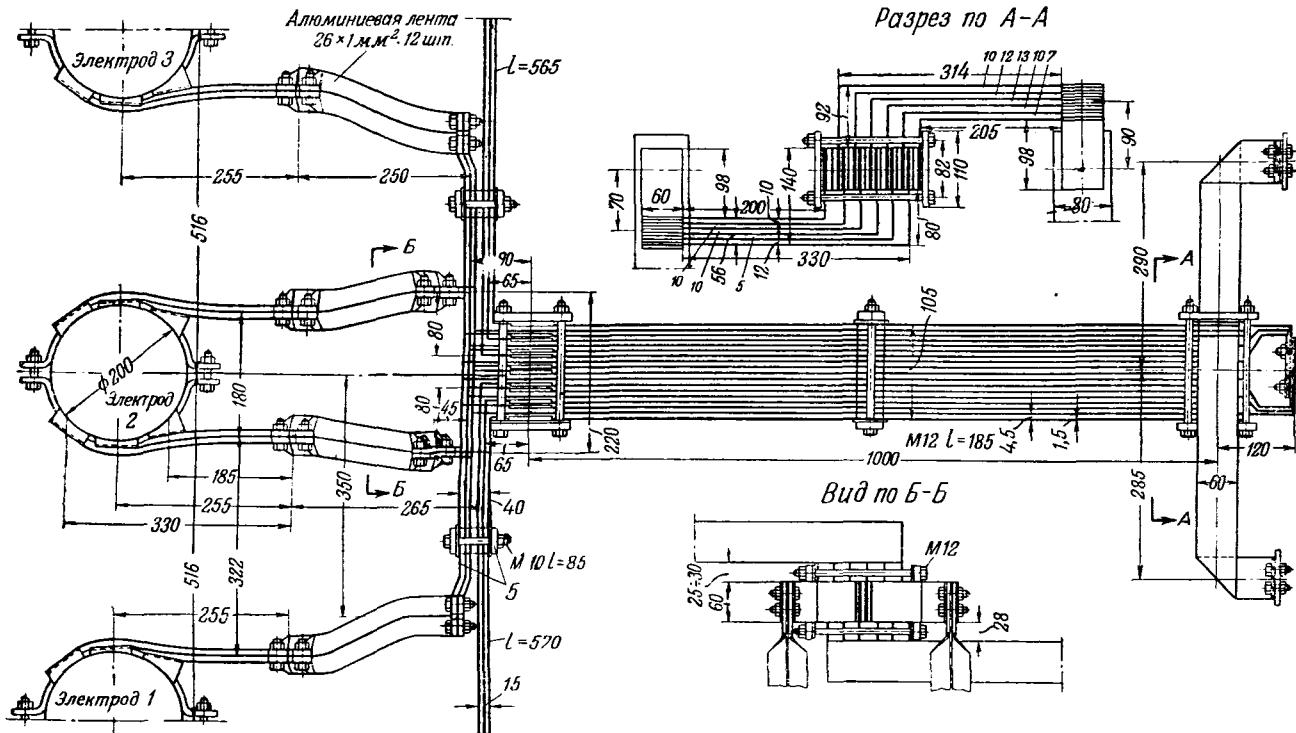


Рис. 1.

Средние значения коэффициентов взаимоиндукции:  $M_{12} = 954$ ;  $M_{13} = 678$ ;  $M_{23} = 952$ . Сопротивление переноса:

$$R_n = \frac{V^3}{2} (X_{12} - X_{13}) = \\ = \frac{V^3}{2} 2\pi \cdot 50 (954 - 578) \cdot 10^{-9} = 0,075 \cdot 10^{-3} \text{ ом.}$$

При токе 1 880 а мощность потерь в модели,

Таблица 1

Наименование цепи	Экспериментальные данные				Расчетные данные	Отклонение расчетных от экспериментальных, %
	$Z$ , м.ом	$R$ , м.ом	$X$ , м.ом	$I$ , см		
<b>Фаза I</b>						
Цепь 1-01 от начала пакета до нуля на электроде 1	0,615	0,556	0,24	763 687	0,216	-10%
<b>Фаза II</b>						
Цепь 2-02 от начала пакета до нуля на электроде 2	0,61	0,584	0,173	552 466	0,147	-15%
<b>Фаза III</b>						
Цепь 3-03 от начала пакета до нуля на электроде 3	0,9	0,865	0,251	800 747	0,235	-6,4%
Среднее значение реактивного сопротивления фазы	-	-	0,221	-	-0,200	-9,5%

считая от начала пакетов, была равна 7 815 вт. Мощность переноса равнялась:

$$\Delta P = 1880^2 \cdot 0,075 \cdot 10^{-3} = 265 \text{ вт},$$

что составляет 3,4% от общей мощности или 10,2% от средней мощности фазы.

Для перехода к промышленной установке реактивное сопротивление модели должно быть увеличено в 5 раз. Таким образом, среднее реактивное сопротивление фазы промышленной установки мощностью 8 250 квт на длине от выхода трансформатора до горна равно:

$$X_{cp} = 0,221 \cdot 10^{-3} \cdot 5 = 1,105 \cdot 10^{-3} \text{ ом.}$$

Переносимая мощность при токе 34 ка:

$$\Delta P = 34000^2 \cdot 0,075 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 434 \text{ квт.}$$

Разница между мощностями первой и третьей фаз, выделяющимися в горне печи, будет составлять около 870 квт.

В модель № 2 было внесено одно изменение, заключавшееся в замене стальных скоб на залуженные медными. Это было сделано с целью удаления из схемы элемента, влияние которого не поддавалось учету и которое вносило расхождение между экспериментальными и расчетными величинами.

В табл. 2 приведены экспериментальные и расчетные значения реактивных сопротивлений  $X$  (в миллионах) сети модели № 2, отнесенные к линейному току (току в электродах).

Коэффициенты взаимоиндукции, определенные из опытов: а) от влияния всех цепей электродов 2 и 3 на цепи электрода 1 — 1 370 см; б) от влияния всех цепей электродов 1 и 3 на

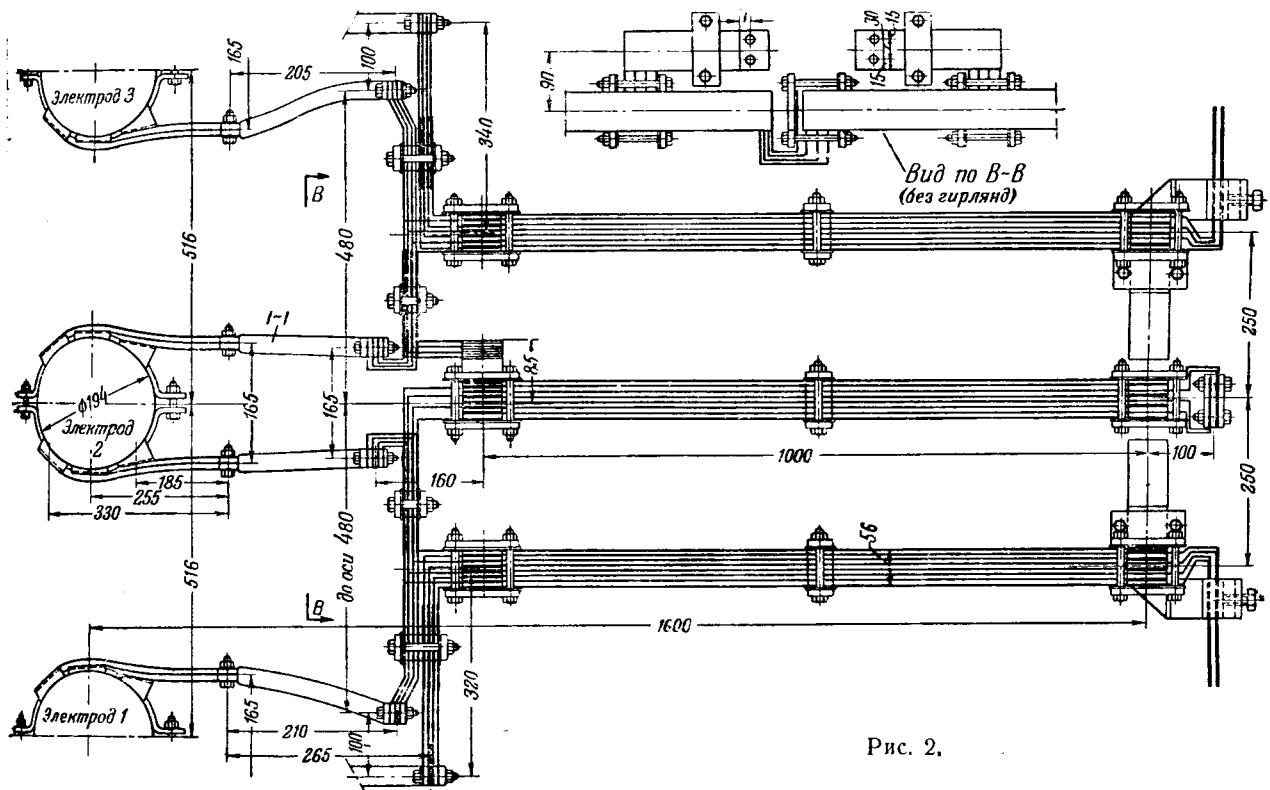


Рис. 2.

Таблица 2

Значения	Фаза (элек- трод) 1	Фаза (элек- трод) 2	Фаза (элек- трод) 3	Сред- нее зна- чение
расчетные . . . . .	0,220	0,181	0,217	0,207
экспериментальные . . . . .	0,200	0,168	0,228	0,200
Отклонение расчетных значений от экспериментальных	+10%	+8%	-4%	+3,5%

и цепи электрода 2 — 1120 см; в) от влияния всех цепей электродов 1 и 2 на цепи электрода 3 — 376 см. Сопротивление переноса между электродами 1 и 2, отнесенное к линейному горку, равно:

$$R_n = \frac{\sqrt[3]{V}}{2\pi f} \cdot (1370 - 1120) \cdot 10^{-9} \cdot \frac{1}{\sqrt[3]{V}} = \\ = 0,0392 \cdot 10^{-3} \text{ } \Omega \text{m.}$$

То же между электродами 3 и 2:

$$R_n = 0,0405 \cdot 10^{-3} \text{ o.m.}$$

В качестве средней величины можно принять  $R_n = 0,04 \cdot 10^{-3} \text{ ом}$ , т. е. 53% от сопротивления переноса в обычной сети.

**Выводы.** Теоретическое исследование и экспериментальная проверка на моделях двух коротких сетей, обычной и рациональной, для электрических печей с несимметричным расположением электродов доказало несомненные преимущества

щества рациональной схемы: 1) реактивное сопротивление сети ниже примерно на 10% и 2) сопротивление переноса, а следовательно, и перенос энергии, уменьшается почти в два раза.

расстояние между пакетами 250  $\text{мм}$ , принятное в модели № 2, очевидно, не является оптимальным при распаде электродов 500  $\text{мм}$ . С увеличением этого расстояния сопротивление переноса, как показывают расчеты, должно еще больше уменьшиться.

Таким образом, в случае применения рациональной схемы перенос энергии может быть уменьшен до такой величины, когда влияние его на работу печи становится практически незначительным.

Рациональная схема короткой сети должна найти свое применение во всех вновь сооружаемых мощных электропечных установках с несимметричным расположением электродов. Она позволяет более широко применять прямоугольные ванны и не прибегать к таким искусственным эксплоатационным мерам, как работа на разных напряжениях или на разных токах, которая сопровождается перегрузкой трансформаторов и несимметричной загрузкой питающей сети. Она должна также найти применение при реконструкции действующих установок.

## Литература

1. Б. М. Струнский. Рациональная схема короткой сети для электропечи с прямоугольной ванной. Электричество, № 7, 1948.

[16. 5. 1949]

# Автоматическое регулирование и стабилизация света в кинотеатрах с помощью селеновых выпрямителей и дросселей насыщения

Кандидат техн. наук, доц. В. Г. КОМАР и кандидат техн. наук Л. И. САЖИН

Всесоюзный научно-исследовательский кино-фотоинститут

Правильное электрическое питание киностанций имеет большое значение для обеспечения высокого качества киноизображения. Кинопроекционные дуговые лампы необходимо питать постоянным током для устранения мигания света на экране и для повышения яркости экрана.

Для питания кинопроекционных дуг в США, Англии и Германии широко применяются газотронные, ртутные купроксные и сульфидные выпрямители, имеющие на стороне переменного тока реактивные балластные сопротивления (необходимые для устойчивого горения дуги). Названные выпрямители не обеспечивают, однако, надлежащего качества кинопроекции, так как колебания сетевого напряжения в обычных пределах вызывают большие изменения тока дуги, а следовательно, сильные изменения яркости дуги и освещенности киноэкрана. Не обеспечивают высокого качества кинопроекции и американские двигатель-генераторы, специально рассчитанные на питание кинодуг. Ток двигателя-генератора не сохраняется стабильным вследствие изменений дугового напряжения при кинопроекции из-за колебаний длины дуги (особенно при лампах с ручной подачей углей). Кроме того, по сравнению с выпрямителями стоимость двигателя-генераторов высокая, к. п. д. низок и они требуют ухода в эксплуатации и больших затрат на установку их в отдельном помещении.

В Англии изготавливались купроксные выпрямители со стабилизатором тока. Ток на выходе выпрямителя сохранялся стабильным вне зависимости от колебаний дугового напряжения. Однако, названные выпрямители не стабилизируют ток при колебаниях сетевого напряжения. Кроме того, они изготавливались очень громоздкими, так как стабилизирующий резонансный контур применялся в главной цепи.

Стабилизированный селеновый выпрямитель с феррорезонансным управлением дросселем насыщения был разработан во Всесоюзном научно-исследовательском кинофотоинституте. Организовано заводское производство названных выпрямителей, предназначенных для питания кинопроекционных дуговых ламп в кинотеатрах.

Принципиальная электрическая схема питающего устройства дана на рис. 1, где: 1 — главный селеновый выпрямитель; 2 — дроссель насыщения; 3 — трансформатор; 4—9 — феррорезонансный контур управления. Феррорезонансный контур управления состоит из следующих частей: 4 — серийный дроссель; 5 — индуктивная катушка с сильно насыщенным сердечником; 6 — конденсатор резонансной цепи; 7 — активное сопротивление; 8 — селеновый выпрямитель для питания обмотки возбуждения дрос-

селя насыщения; 9 — переключатель ступеней тока выпрямительного устройства.

Дано краткое описание новых статических устройств автоматического регулирования и стабилизации света с помощью селеновых выпрямителей и дросселей насыщения. Приведены принципиальные электрические схемы: стабилизированного выпрямителя, предназначенного для питания кинопроекционных дуг, и статического селенового темнителя света, предназначенного для плавного включения и выключения света в начале и конце сеанса в кинотеатре. Изложен принцип действия названных устройств, указаны результаты их испытания и отмечены преимущества новых установок по сравнению с установками, ранее применяемыми в кинотеатрах.

Параметры феррорезонансной цепи управления выбираются таким образом, что даже весьма малые отключения тока нагрузки от нормала на входе контура управления дают многократные изменения тока на выходе контура — в обмотке возбуждения дросселя насыщения. Например, небольшое возрастание тока нагрузки (вследствие изменения дугового или сетевого напряжения) влечет за собой некоторое возрастание напряжения серийного дросселя 4. Увеличение напряжения приводит к возрастанию тока в резонансной цепи, вследствие чего индуктивность катушки 5 уменьшается, а по этому полное сопротивление цепи катушки 5 и конденсатора 6 вследствие резонанса резко снижается. По этой причине резонансная цепь, состоящая из магнито-насыщенной катушки и конденсаторов, как бы закорачивает сам новый выпрямитель, параллельно присоединенный к резонансному контуру. В результате ток в обмотке возбуждения дросселя насыщения 2 уменьшается, индуктивность обмоток переменного тока дросселя насыщения увеличивается и автоматически восстанавливается начальное значение тока дуги.

На рис. 2 приведены результаты записи самопишущих приборов при питании кинопроекционной дуги с стабилизированным выпрямителем. Световой поток кинопроекционных ламп при питании от стабилизированного выпрямителя изменяется незначительно.

Наряду с обеспечением стабильной яркости экрана стабилизированный селеновый выпрямитель обладает рядом других преимуществ.

1. Надежность в работе. Опытная эксплуатация образцов стабилизированных селеновых выпрямителей в течение двух лет в нормальных условиях кинотеатров показала отсутствие каких-либо нарушений в работе. Большая надежность и долговечность обеспечиваются применением селеновых вентилей, имеющих большой срок службы, а также использованием статического безлампового стабилизатора, препятствующего перегреву выпрямителя.

2. Высокий коэффициент полезного действия (60—70%) благодаря отсутствию активного балластного сопротивления. При замене обычной установки с балластным реостатом на стабилизированный выпрямитель расходы по замене (включая стоимость выпрямителя) окупаются обычно меньше, чем за год, в результате экономии электроэнергии.

3. Отсутствие необходимости в н

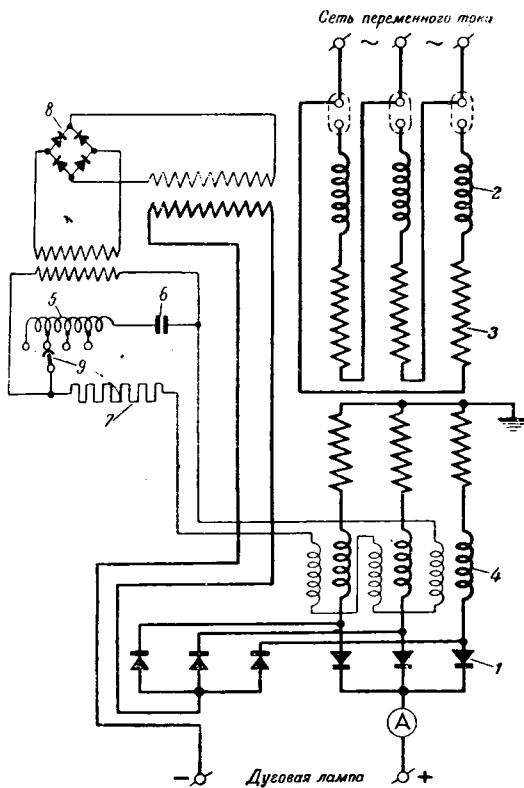


Рис. 1. Принципиальная схема стабилизированного селенового выпрямителя.

прерывном уходе. В устройстве нет подвижных деталей или элементов, требующих обслуживания и имеющих ограниченный срок службы.

4. Экономичность в производстве. Стабилизированный выпрямитель вследствие наличия ферро-резонансного контура не в главной цепи, а в цепи управления имеет вес обмоточных деталей (трансформаторов и индуктивных катушек) только на 35% больше нестабилизированного выпрямителя. Однако, в целом стабилизированный выпрямитель даже несколько дешевле, так как стабилизатор автоматически ограничивает ток перегрузки и перенапряжение при холостом ходе и позволяет поэтому сократить размеры выпрямителя.

Таким образом, стабилизированный селеновый выпрямитель является наилучшим решением проблемы питания кинопроекционных дуг, более совершенным, чем решения, полученные за границей. Схема стабилизированного выпрямителя является оригинальной<sup>1</sup>.

Статический селеновый темнитель света с тепловым управлением магнито-насыщенными катушками был разработан во Всесоюзном научно-исследовательском кинофотоинституте для плавного включения и выключения света в начале и конце сеанса в кинотеатре<sup>2</sup>. Резкие изменения света в зрительном зале неблагоприятно влияют на зрителей, нарушают условия правильного видения в связи с адаптацией глаза. Новый селеновый темнитель отличается от известных темнителей тем, что является статическим аппаратом и обладает рядом существенных преимуществ.

Основными частями статического темнителя света являются: дроссели насыщения, селеновые выпрямители, трансформаторы и проволочные сопротивления (рис. 3). Если выключатель К выключен, то переменный ток на-кала от трансформатора 9 не проходит через стальные прорезиненные проволочные спирали 6. В таком холодном

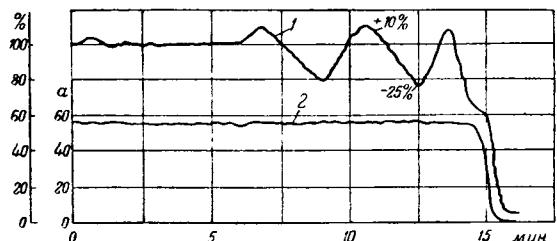


Рис. 2а.

а—влияние колебаний сетевого напряжения на выпрямленный ток стабилизированного селенового выпрямителя. 1—напряжение питающей сети; 2—ток на выходе выпрямителя.

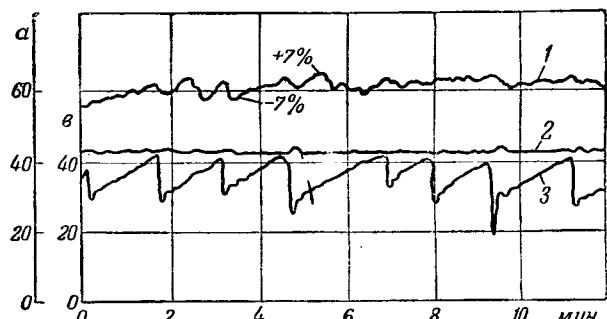


Рис. 2б. Влияние колебаний дугового напряжения (выход выпрямителя) на ток выхода стабилизированного выпрямителя и на световой поток кинопроекционной лампы.

1—световой поток дуговой лампы; 2—ток; 3—напряжение на выходе выпрямителя.

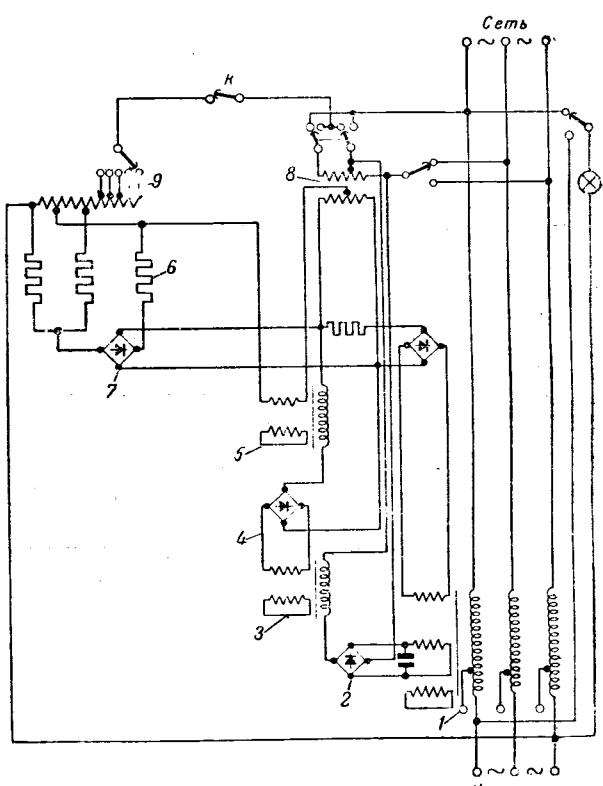


Рис. 3. Принципиальная схема статического селенового темнителя света для кинотеатров.

<sup>1</sup> Авторское свидетельство на стабилизированный выпрямитель № 73901. В. Г. Комар, Л. И. Сажин. Класс 21 I, 12/02. 21/X 1947.

<sup>2</sup> Авторское свидетельство: В. Г. Комар, П. П. Мотов. Класс 21 с, 38. Заявка № 385803. 3, XI, 1948.

состоянии мост уравновешен и ток на выходе моста, а следовательно, на входе магнитного усилителя 5, отсутствует, несмотря на то, что через проволочные сопротивления 6 проходит небольшой постоянный ток от селенового выпрямителя 7 и питающего трансформатора 8. Вследствие этого ток на выходе магнитного усилителя 2 и одновременно с тем и в обмотке возбуждения главного дросселя насыщения 1 мал. Поэтому главный дроссель насыщения 1 имеет при выключенном выключателе К весьма большую индуктивность и практически все напряжение сети падает на катушку. Напряжение на лампах незначительно и света в зале нет.

При включении выключателя К проволочные спирали 6 получают питание от накального трансформатора 9. Сопротивление спиралей вследствие нагрева постепенно увеличивается, равновесие моста нарушается. Ток на входе и, следовательно, на выходе магнитного усилителя постепенно возрастает, индуктивности дросселя насыщения 1 снижается, напряжение на лампах зрительного зала увеличивается. При полном зажигании света почти все напряжение сети падает на нагрузку (около 95%). При выключении выключателя К сопротивления 6 медленно охлаждаются, равновесие моста восстанавливается и главный дроссель насыщения, постепенно увеличивая свое сопротивление, затемняет свет в зрительном зале. Размеры проволоки 6 выбираются таким образом, что постоянная

времени ее охлаждения соответствует оптимальному времени затемнения света. При зажигании света для получения оптимального времени зажигания напряжение накального трансформатора постепенно меняется за счет изменения напряжения главного дросселя насыщения. Магнитный усилитель рассчитан на усиление весьма небольшой мощности сигнала, поступающего от тепловой моста, до достаточно значительной мощности, необходимой для питания обмотки возбуждения главного дросселя насыщения.

Новый статический селеновый темнитель света обладает следующими преимуществами по сравнению с применяемыми темнителями:

1. Обеспечивает правильный режим плавного и равномерного затемнения света в зрительном зале.

2. Зажигание и затемнение света происходит совершенно автоматически после поворота рукоятки выключателя.

3. Темнитель не требует какого-либо ухода и обслуживания в эксплуатации.

4. Данная система обеспечивает надежную работу, так как все основные детали темнителя являются неподвижными и имеют весьма большой срок службы. Продолжительная опытная эксплуатация образца статического темнителя света в нормальных кинотеатральных условиях показала его высококачественную и надежную работу.

[18.4.19]



## Электронные усилители ПОСТОЯННОГО ТОКА

Доцент А. А. СОКОЛОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

**Требования к измерительным усилителям.** В технике связи говоритель приемника воздействует на человеческое ухо, чувствительность которого подчиняется закону — «ощущение пропорционально логарифму раздражения». Если усиление радиоприемника изменилось, например, на 12%, то ухо слушателя почти не воспринимает изменения интенсивности передачи, т. е. такое изменение не существенно. В автоконтроле погрешность установки редко превышает 1%; усиление измерительных усилителей должно быть стабильным с погрешностью в 0,1% и менее. Такую стабильность можно получить, несмотря на то, что лампы применяются обычные, разброс параметров которых составляет  $\pm 10\%$ .

**Методы контроля неэлектрических величин.** Измерение и контроль неэлектрических и электрических величин осуществляются, главным об-

разом, электрическими методами, для чего контролируемые величины предварительно преобразуются в электрические посредством особых преобразователей или датчиков. В табл. 1 даны

примеры такого преобразования. Принципиальная схема автоматического контроля показана на рис. 1.

Из табл. 1 видно, что выходным параметром большинства современных датчиков является напряжение постоянного тока. Имеется тенденция измерять даже электрические параметры — такие, как фаза, частота, мощность, — посредством преобразования их в напряжение постоянного тока. Это необходимо в тех случаях, когда измерение делается для целей контроля или регулирования.

Конструкции современных датчиков таковы, что их выходное напряжение, как правило, мало, внутреннее сопротивление зачастую весьма велико и выходная мощность незначительна.

Датчик сам по себе своим собственным током не способен включить реле или вращать электродвигатель. В автоконтrole, как правило, между датчиком и исполнительным механизмом имеется усилитель. Электроника используется в автоконтроле, в основном, для преобразования одних электрических величин в другие. Наибольшее значение для практики имеет преобразование амплитуды, т. е. усиление. Усиление напря-

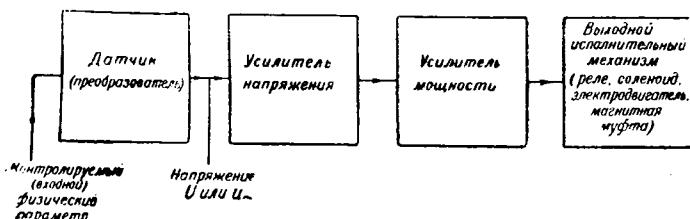


Рис. 1.

Таблица 1

Преобразуемая контролируемая величина	Преобразователь (датчик)	Электрическая величина на выходе датчика
Механическое перемещение	Индуктивный датчик Реостатный датчик	Напряжение переменного тока Напряжение переменного или постоянного тока
Напряжение постоянного тока	Дифференциатор (контура $RC$ )	Напряжение постоянного тока, пропорциональное скорости изменения входного напряжения
Напряжение постоянного тока	Интегратор (контура $RC$ )	Напряжение постоянного тока, пропорциональное интегралу входного напряжения
Давление	Тензодатчик	Напряжение переменного тока
Температура	Кристалл кварца Термопара	Напряжение постоянного тока
Световой поток Цветность. Степень отражения света и др.	Термометр сопротивления Фотоэлемент	Напряжение постоянного или переменного тока
Концентрация рН водородных ионов	Стеклянные или каломельные электроды	Напряжение постоянного тока
Промежуток времени	Электрический (контура $RC$ )	Напряжение постоянного тока
Мощность переменного тока	Термоумформерный датчик	Напряжение постоянного тока
Изменение угла сдвига фаз между двумя напряжениями	Фазовый детектор	Напряжение постоянного тока
Изменение частоты	Дискриминатор	Напряжение постоянного тока
Частота	Электронный частотомер	Напряжение постоянного тока

жения редко больше  $10^5$ ; усиление тока бывает порядка  $10^7$ — $10^8$ ; усиление мощности  $10^9$ — $10^{10}$ . В линейном усилителе входное и выходное напряжения одинаковы по форме и различны по величине.

**Классы усиления.** Усилитель класса А отличается тем, что весь полный период напряжения сигнала укладывается в линейном участке сеточной характеристики усилительной лампы (рис. 2). Максимальный отрицательный сигнал ограничивается точкой  $B$ , левее которой начинается нелинейная часть сеточной характеристики лампы. Максимальный положительный сигнал определяется точкой  $C$ , в которой начинается электрополый сеточный ток лампы. Смещение  $E_g$  выбирается так, чтобы точка  $A$  находилась в середине между точками  $B$  и  $C$ .

Класс  $A_1$  характеризуется тем, что напряжение между сеткой и катодом равно нулю в момент максимального положительного напряжения сигнала. Когда напряжение сигнала равно или близко к максимальному положительному значению, имеют место нелинейные искажения.

Коэффициент полезного действия усилителей класса А порядка 25%.

В классе В рабочая точка покоя  $A$  устанавливается вблизи напряжения отсечки. Лампа проводит ток только в течение положительного полупериода напряжения сигнала. Одна лампа в режиме класса В работает в качестве анодного детектора, случай, часто встречающийся в конструкциях электронных реле. Две лампы в схеме двухтактного каскада работают в режиме класса В с весьма небольшими нелинейными искажениями — практически в режиме линейного усилителя. Класс  $B_1$  отличается тем, что в момент максимального положительного напряжения сигнала напряжение между сеткой и катодом проводящей лампы равно нулю. Класс  $B_2$  характерен тем, что в течение части положительного полупериода сигнала напряжение между сеткой и катодом лампы положительно, сеточный ток велик, нелинейные искажения значительны (рис. 3); применяется в оконечных каскадах, когда необходимо отдать в нагрузку большую мощность; к. п. д. усилителя в классе В порядка 50—65%.

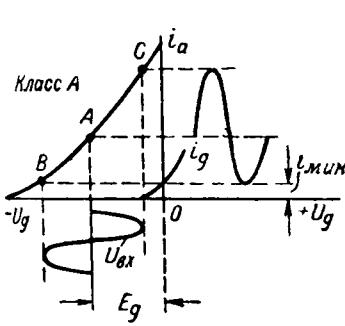


Рис. 2.

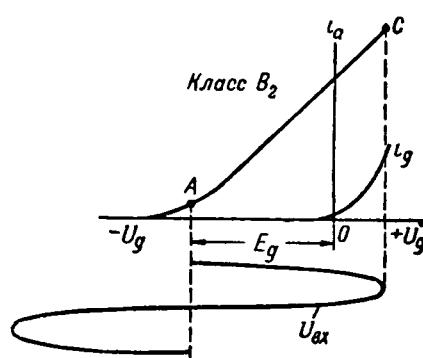


Рис. 3.

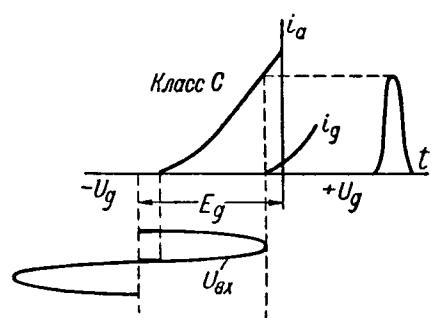


Рис. 4.

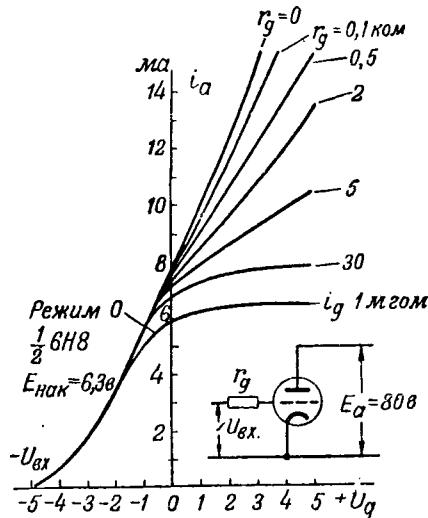


Рис. 5.

В классе С смещение  $E_g$  велико, лампа проводит лишь в течение доли положительного полупериода напряжения сигнала (рис. 4). Нелинейные искажения весьма велики; к. п. д. усилителя класса С максимальен, порядка 80% и выше, поскольку каскад в отсутствие сигнала вообще не потребляет мощность в анодной цепи. Усилители класса С широко применяются в автоконтrole в качестве электронных выключателей, импульсных усилителей и анодных детекторов. Изменяя смещение  $E_g$ , легко получить амплитудный селектор, реагирующий на сигнал, амплитуда которого больше  $E_g - U_{gомс}$ , где  $U_{gомс}$  — сеточное напряжение отсечки анодного тока. Точность работы такого амплитудного селектора зависит от того, насколько мала криволинейная часть сеточной характеристики. Промышленность выпускает специальные пентоды с короткой сеточной характеристикой, например, 6Ж1Б.

**Режим О** характерен тем, что лампа работает в режиме сеточного тока: в цепи сетки включено большое последовательное сопротивление  $R_g$ . Благодаря тому, что  $R_g \gg R_{ig}$  (где  $R_{ig}$  — внутреннее сопротивление лампы между ее электродами сетка — катод), почти все напряжение сигнала падает на сопротивление  $R_g$ , и напряжение между сеткой и катодом практически неизменно, равно нулю и не зависит от напряжения сигнала (рис. 5). Ограничитель амплитуды тока применяется, когда следующий за ним каскад должен реагировать не на амплитуду, а на другой параметр, например, на частоту или фазу.

**Режим „ВМ“ (варимю).** При изменении смещения управляющей сетки лампы варимю, параметры лампы  $S$ ,  $\mu$  и  $R_i$  изменяются. Это можно использовать для автоматической регулировки усиления или для получения управляемого сопротивления (величина которого зависит от смещения на управляющей сетке). Такой способ управления дает большие нелинейные искажения, когда амплитуда сигнала больше десятой вольта.

Подобное управление можно осуществить,

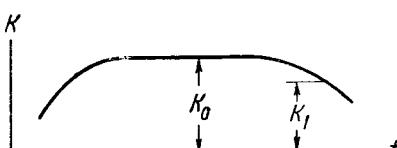


Рис. 6.

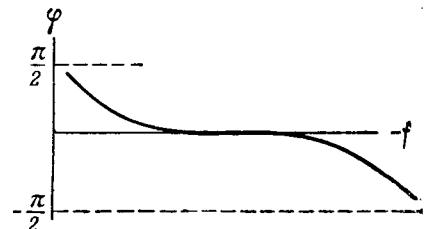


Рис. 7.

изменяя напряжение экранной сетки пентода или используя режим работы на хвосте характеристики триода. Недостаток последней схемы состоит в том, что анодный ток мал, крутизна  $\mu$  малы, усиление получается небольшое. Если требуется получить усиление, изменяемое в сравнительно небольших пределах (порядка 10—30) и нелинейные искажения должны быть невелики при сигналах порядка 0,5 в, то лучше использовать не лампу варимю, а высокочастотный пентод, соединив его триодом (экранная сетка соединяется с анодом).

**Искажения.** Усилитель представляет собой не идеальное устройство, в нем имеют место линейные и нелинейные искажения усиливаемого сигнала.

Линейные искажения вызваны наличием реактивных сопротивлений (емкостей и индуктивностей) в схеме усилителя. В усилителе постоянного тока ими являются междуэлектродные емкости ламп и емкости монтажа.

**Частотные искажения.** Коэффициент усиления усилителя зависит от частоты сигнала, если в усилительной схеме существуют реактивные сопротивления. На рис. 6 показана частотная характеристика усилителя с реостатно-емкостной связью. В том диапазоне частот сигнала, в котором можно пренебречь влиянием реактивных сопротивлений схемы, усиление не зависит от частоты, следовательно, частотные искажений нет. На краях частотной характеристики сказывается влияние реактивных сопротивлений схемы усилителя, усиление падает. Частотные искажения в этом случае определяются коэффициентом

$$M_{\omega_1} = \frac{K_0}{K_1}, \quad (1)$$

где  $K_0$  — усиление в области отсутствия частотных искажений;

$K_1$  — модуль усиления на частоте  $\omega_1$ . Требования к частотным искажениям в измерительных усилителях весьма суровы:

**Фазовые искажения** выражаются зависимостью фазного сдвига выходного напряжения усилителя относительно входного от частоты сигнала (рис. 7). Величина фазовых искажений на частоте  $\omega_1$  определяется значением тангенса фазового угла между векторами  $U_{вых}$  и  $U_{вх}$ :

$$M_{\varphi_1} = \operatorname{tg} \varphi_1. \quad (2)$$

В той области частот сигнала, где нет частотных искажений, нет и фазовых искажений. Частоты

Фазные искажения обычных усилительных каскадов связаны несложными соотношениями. Усиление простого каскада на частоте  $\omega_1$  выражается вообще уравнением

$$K_1 = \frac{dU_{\text{вых}}}{dU_{\text{вр}}} = \frac{A}{B + jC}, \quad (3)$$

где  $A, B, C$  — постоянные.

Из равенства (3) видно, что

$$M_{\varphi_1} = -\frac{C}{B}. \quad (4)$$

В диапазоне частот сигнала, где нет частотных искажений,  $C=0$ ; в этом диапазоне усиление оставляет:

$$K_0 = \frac{A}{B}.$$

Чевидно, что коэффициент частотных искажений составляет:

$$M_{\omega_1} = \sqrt{1 + \left(\frac{C}{B}\right)^2} = \sqrt{1 + (M_{\varphi_1})^2}. \quad (5)$$

Фазные искажения усилителей, предназначенных для автоконтроля, — весьма важная характеристика. Такие усилители часто работают на фазный исполнительный механизм — на фазный каскад, конденсаторный двигатель и т. п. Фазные искажения непосредственно связаны с переходными искажениями, и поэтому одна из этих характеристик может быть оценена по другой.

**Переходные искажения.** При включении единичного напряжения на вход усилителя его выходное напряжение не возрастает скачком, онорастет постепенно; его форма вообще имеет вид, показанный на рис. 8. Переходные искажения характеризуются двумя величинами: «временем фронта», т. е. длительностью интервала времени, течение которого выходное напряжение каскада возрастает от 10 до 90% от своего номинального установившегося стопроцентного значения; величиной «всплеска» в процентах, т. е. величиной максимального отклонения выходного напряжения  $\Delta U$  во время переходного процесса сверхстановившегося стопроцентного значения. В импульсных усилителях время фронта очень мало, может быть уменьшено до сотых долей микрекунды. Допустимое значение всплеска — от 1% (измерительный усилитель) до 80% (сервоусилитель). В однокаскадном усилителе всплеск существует, если только в схеме имеются индуктивности. Увеличивая выбег, можно сократить время фронта.

Если усиление каскада определяется равенством (3), нетрудно показать, что

$$U_{\text{вых}} = +U_{\text{вр}} \frac{A}{D} [1 - e^{-at}], \quad (6)$$

где  $D = \frac{C}{\omega}$ ;  $t = \frac{1}{a} = \frac{D}{B}$  — постоянная времени каскада для высших частот. Из (6) находим время фронта

$$t_{\varphi p} = \frac{1}{a} [\ln 10 - \ln 1,1] = 2,2t \quad (7)$$

$$t_{\varphi p} = -\frac{2,2M_{\varphi_1}}{\omega_1} = -\frac{2,2\sqrt{(M_{\omega_1})^2 - 1}}{\omega_1}. \quad (8)$$

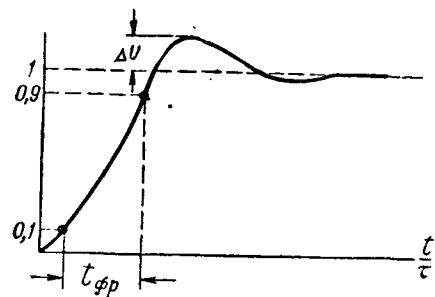


Рис. 8

Уравнение (8) связывает переходные и установившиеся искажения. Переходные искажения имеют наибольшее значение в технике импульсного автоконтроля.

**Нелинейные искажения** вызываются нелинейностью характеристик ламп и нелинейностью элементов усилительных схем. Строго говоря, даже триод в режиме класса А не имеет идеально линейную характеристику. Поэтому, если форма входного сигнала представляет собой идеальную синусоиду частоты  $\omega$ , то выходное напряжение любого усилителя будет искажено, т. е. будет отличаться от идеальной синусоиды. Амплитудная характеристика реального усилителя нелинейна; выходное напряжение растет менее быстро, чем входной сигнал.

Нелинейные искажения оцениваются коэффициентом искажений.

$$K_{\varphi} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots}}{U_1}, \quad (9)$$

где  $U_1, U_2, U_3$  и т. д. — амплитуды первой, второй, третьей и т. д. гармоник выходного напряжения.

Если лампа работает на реле или на электродвигатель, допустим коэффициент искажений 5% и в отдельных случаях до 15%. Для измерительных усилителей допускается коэффициент искажений порядка 0,05%. Когда усилитель работает в счетно-решающем устройстве, погрешность, вносимая усилителем, не должна превышать  $\pm 0,05\%$ . Если всю погрешность отнести за счет нелинейности и считать сеточную характеристику лампы параболической

$$i_a = a_1 U_{\text{вр}} + a_2 U_{\text{вр}}^2, \quad (10)$$

то коэффициент искажений усилителя решателя будет:

$$K_{\varphi} = \frac{U_{\text{вр}} a_2}{2 a_1} \quad (11)$$

Нелинейность, вносимая усилителем, определяется, главным образом, характеристикой оконечной лампы, которая работает с большой раскачкой, т. е. в режиме значительных изменений анодного тока.

**Усилители постоянного тока** служат для усиления малых медленно изменяющихся напряжений постоянного тока. Основная трудность их кон-

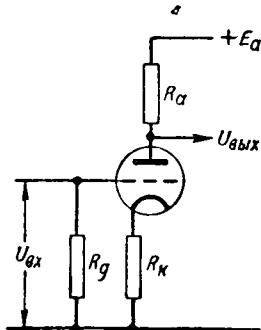


Рис. 9.

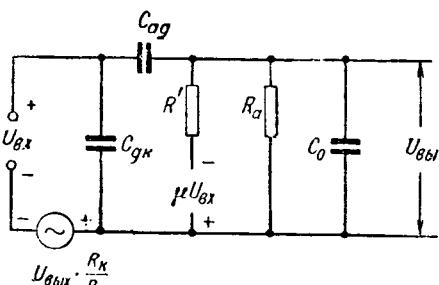


Рис. 10.

стрирования состоит в уменьшении нестабильности нуля<sup>1</sup>, которая представляет собою медленное, самопроизвольное изменение выходного напряжения. Линейный усилитель постоянного тока работает в классе А; ток его

$$i_a = \frac{E_a - E_{an} + \mu U_{gx}}{R_i}, \quad (12)$$

где  $E_{an}$  — напряжение приведения [1].

*Каскад типа "gk"* показан на рис. 9, где  $R_k$  — сопротивление автоматического смещения;  $R_a$  — сопротивление нагрузки. Из рис. 9 и равенства (12) находим:

$$i_a = \frac{E_a - E_{an} + \mu U_{gx}}{R_a + R_i + R_k(1 + \mu)}. \quad (13)$$

Следовательно, усиление каскада равно:

$$K_0 = -\frac{d i_a \cdot R_a}{d U_{gx}} = \frac{-\mu \cdot R_a}{R_a + R_i + R_k(1 + \mu)}. \quad (14)$$

Автоматическое смещение вводит противосвязь по току, благодаря чему сопротивление лампы возрастает и становится равным  $R' = R_i + R_k(1 + \mu)$  (включая  $R_k$ ). Схемы замещения для высших частот каскада с автоматическим смещением показаны на рис. 10 и 11; легко видеть, что входная емкость составляет:

$$C_{gx} = a \cdot C_{kg} + C_{ag}(a + K) + C_{монтаж}, \quad (15)$$

где

$$a = \frac{R_a + R_i + R_k}{R_a + R_i + R_k(1 + \mu)}, \quad (16)$$

<sup>1</sup> Нестабильность нуля вызывается изменениями напряжения питаний, температуры катода, изменениями сопротивлений схемы и другими причинами.

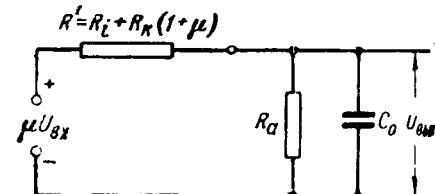


Рис. 11.

а усиление высших частот:

$$K = \frac{K_0}{1 + j\omega\tau}, \quad (17)$$

где

$$\tau = C_0 \frac{R' \cdot R_a}{R' + R_a} \quad (18)$$

есть постоянная времени каскада для высших частот;  $C_0$  — входная емкость следующего каскада.

*Графический анализ каскада.* На оси анодных напряжений семейства анодных характеристики лампы откладываем анодное питание схемы  $E_a$ ; из полученной точки  $N$  проводим линию нагрузки под углом  $\alpha$ , где  $\operatorname{ctg} \alpha = R_a$ . Если в схеме есть автоматическое смещение  $R_k$ , необходимо статические анодные характеристики перестроить под углом  $\vartheta$ , где  $\operatorname{ctg} \vartheta = R_i + R_k(1 + \mu)$  (рис. 12). При изменении сигнала  $U_{gx}$  значение анодного тока (рабочая точка) скользит по линии нагрузки  $MN$ . Графический анализ показывает при каких сигналах появляются искажения.

*Каскад типа "ag"* работает только при наличии независимого смещения  $E_g$ , где  $|E_g| > E$  (рис. 13). Из (12) находим, что

$$i_a = \frac{E_a(1 + \mu) - E_{an} + \mu(U_{gx} - E_g)}{R_a + R_i}. \quad (19)$$

В этой схеме анод более чувствителен, чем сетка: схема удобна для управления как со стороны анода, так и со стороны сетки.

*Катодно-входной каскад* (типа km) имеет малое входное сопротивление; его выходное напряжение находится в фазе со входным напряжением; частотная характеристика более широкополосная, чем в схеме типа gk (управляющая сетка играет роль экрана между анодом и катодом) — рис. 14. Для рис. 14

$$i_a = \frac{[E_a - E_{an}] - U_{gx}(1 + \mu) + U_{T\partial}(1 + \mu)}{R_a + R_i + R_k \cdot (1 + \mu)}. \quad (20)$$

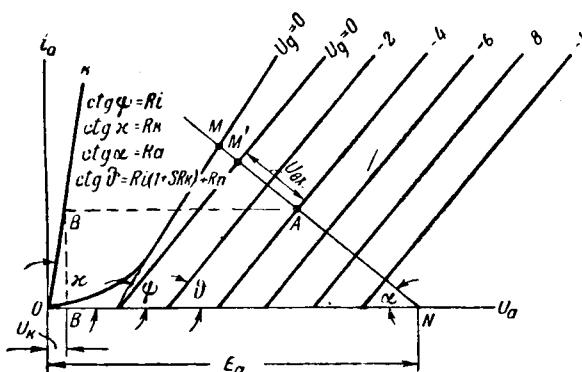


Рис. 12.

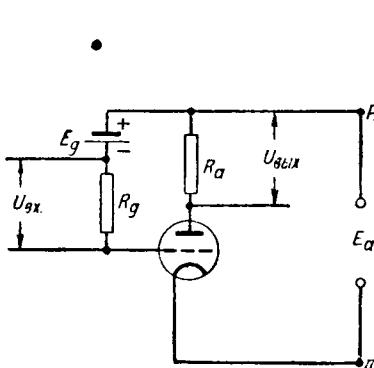


Рис. 13.

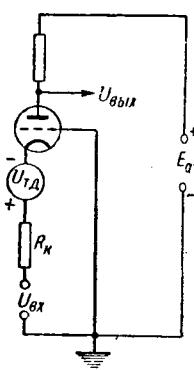


Рис. 14.

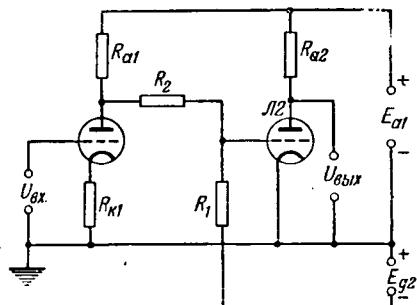


Рис. 15.

иление каскада

$$K = \frac{(1 + \mu)R_a}{R_a + R_i + R_k(1 + \mu)}, \quad (21)$$

его крутизна

$$S_\kappa = \frac{1}{R_a + R_i} + R_k. \quad (22)$$

Входное сопротивление катодно-входного каскада

$$R_{ex} = \frac{R_a}{K} = \frac{R_a + R_i}{1 + \mu} + R_k. \quad (23)$$

Для пентода

$$\mu \gg 1; R_i > R_a; R_{ex} \approx \frac{1}{S} + R_k. \quad (24)$$

**Каскадное соединение** нескольких каскадов осуществляется так, что выход предыдущего каскада является входом последующего, а источник анодного питания общий. При наличии общего источника анодного питания нельзя непосредственно присоединить анод предыдущего каскада с сеткой последующего потому, что потенциал сетки последующего будет чрезмерно велик и положителен, лампа выйдет из класса А. Каскадное соединение выполняется посредством междукаскадных делителей (рис. 15). Если  $E_a = E_{g2}$ , то

$$K = \frac{-\mu R_a}{R_a + 2R_i}. \quad (25)$$

Частотная характеристика на высших частотах улучшается, если зашунтировать  $R_2$  большой ёмкостью. Другой способ — применение „режимных“ ламп (рис. 16). В этом случае потенциал катода лампы  $L2$  на несколько вольт выше потенциала анода лампы  $L1$ , потому что через  $R_{k2}$  проходит большой ток лампы  $L3$ , на сетку которой подается положительный сигнал с делителя.

Усиление режимного каскада

$$K = \frac{-\mu R_a}{R_a + R_i + \frac{(1 + \mu)R_i}{1 + \mu + R_i/R_k}}. \quad (26)$$

Нестабильность нуля схем рис. 15 и 16 велика; они удовлетворительно работают только при наличии стабилизированного питания.

**Нестабильность нуля.** Если даже все напряжения на лампе неизменны, ее анодный ток со временем изменяется; наиболее заметные изменения в течение первых 100 час. работы.

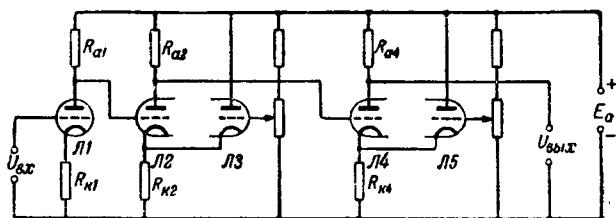


Рис. 16.

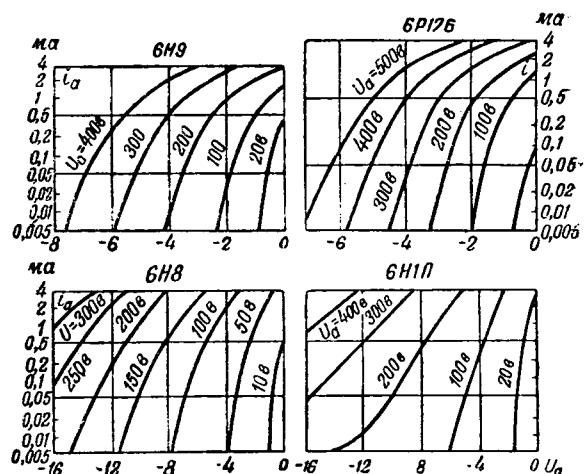


Рис. 17а.

Основные причины нестабильности нуля — изменение напряжений питания, температуры катода и контактной разности потенциалов между сеткой и катодом (старение катода).

Входной каскад усилителя постоянного тока, как правило, работает в режиме малых анодных токов. В

этом режиме нестабильность нуля меньше и ее легче скомпенсировать; анодный ток не подчиняется закону степени трех вторых, а следует (в некоторых пределах) экспоненциальному закону. Характеристики разных экземпляров ламп одного типа сильно отличаются по масштабу, хотя форма характеристик сохраняется. На рис. 17а, даны характеристики триодов, работающих в режиме малых анодных токов. Очевидно, что при заданном  $U_a$  крутизна

$S = \frac{di_a}{dU_g}$  больше для лампы с большим  $\mu$ ; при увеличении  $U_a$  крутизна ламп с малым  $\mu$  быстро, уменьшается, а у ламп с большим  $\mu$  изменяется мало. При заданных значениях  $U_a$  и  $i_a$  крутизна больше у ламп с большим  $\mu$ . Для данного триода крутизна возрастает с уменьшением  $U_a$ . Таким образом, максимальное усиление получается, если применяется триод с большим  $\mu$ ,  $U_a$  мало, насколько это возможно и значение анодного

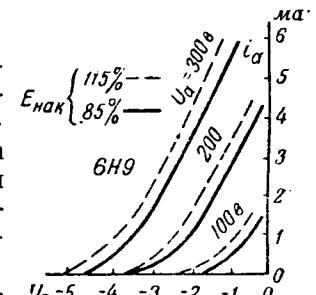


Рис. 17б.

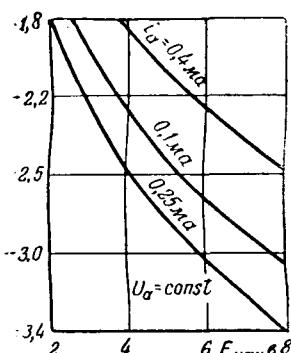


Рис. 18.

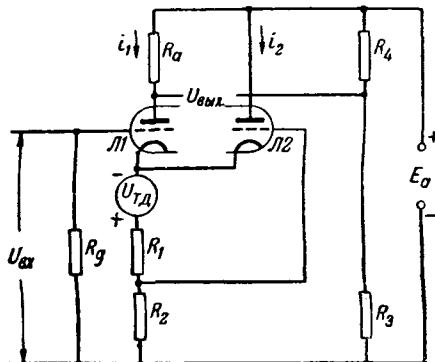


Рис. 19.

тока покоя выбрано на участке, где прямые переходят в кривые (рис. 17а). Параметры входного каскада подбираются по опытным кривым (рис. 17а), тогда как параметры последующих усилительных каскадов постоянного тока, работающих в режиме больших анодных токов, рассчитываются аналитически [уравнение (12) и др.]. Поскольку входные сигналы малы, нелинейность характеристики  $i_a = f(U_g)$  не оказывается. Чтобы сетка не пострадала при случайном включении большого сигнала, последовательно с ней включается большое ограничивающее сопротивление.

**Температурная нестабильность.** При уменьшении напряжения накала триода или диода анодный ток падает (рис. 17б); в катоде как бы появляется источник напряжения  $\Delta U_{T\delta}$ ; рис. 18 показывает, что при заданном  $E_{\text{нак}} \frac{\Delta U_{T\delta}}{\Delta E_{\text{нак}}}$  почти не зависит от значения анодного тока, если он мал, меньше 1 мА. Входной каскад усилителя надо ставить именно в этот режим, чтобы уменьшить  $\Delta U_{T\delta}$ ; если сигнал невелик, характеристику лампы можно считать линейной. Все лампы с оксидным катодом при  $\Delta E_{\text{нак}} = \pm 10\%$  имеют  $\Delta U_{T\delta} = \pm 100$  мВ; при больших анодных токах  $\Delta U_{T\delta} = \pm 200$  мВ. Каскад с ламповой компенсацией температурной нестабильности показан на рис. 19, где  $M1$  —

то, если он мал, меньше 1 мА. Входной каскад усилителя надо ставить именно в этот режим, чтобы уменьшить  $\Delta U_{T\delta}$ ; если сигнал невелик, характеристику лампы можно считать линейной. Все лампы с оксидным катодом при  $\Delta E_{\text{нак}} = \pm 10\%$  имеют  $\Delta U_{T\delta} = \pm 100$  мВ; при больших анодных токах  $\Delta U_{T\delta} = \pm 200$  мВ. Каскад с ламповой компенсацией температурной нестабильности показан на рис. 19, где  $M1$  —

усилительная лампа,  $M2$  — компенсационная. Из (12) находим, что  $i_{a1} \neq f(U_{T\delta})$ , если

$$\mu = \frac{R_i}{R_2}. \quad (27)$$

Усиление схемы рис. 19 составляет:

$$K = \frac{-\mu R_a}{R_a + 2\mu R_2}. \quad (28)$$

Результаты компенсации: когда  $\Delta E_{\text{нак}} = \pm 5\%$   $\Delta U_{T\delta}$  уменьшается в схеме рис. 19 примерно в 50 раз, когда  $\Delta E_{\text{нак}} = \pm 10\%$ ,  $U_{T\delta}$  примерно в 8—10 раз меньше  $U_{T\delta}$  некомпенсированного усилителя.

Диодная компенсация  $\Delta U_{T\delta}$  (рис. 20а) [Л. 2] более проста, но менее совершенна: она дает приблизительно десятикратное улучшение по сравнению с некомпенсированным усилителем. Электродвижущая сила собственных скоростей электронов, вылетающих из катода, есть линейная функция напряжения накала (рис. 20б). Теоретически, посредством диодной компенсации,  $\Delta U_{T\delta}$  уменьшается в  $\frac{r_d + R_k}{r_d}$  раз, где  $r_d$  — сопротивление диода переменному току. Ток через  $R_k$  должен быть больше максимального анодного тока; падение напряжения на  $R_k$  должно быть больше 10%.

**Исключение нестабильности нуля, вызванной изменением анодного питания.  $\mu$ -каскад.** Выходное напряжение  $\mu$ -каскада не зависит от изменения анодного питания, если  $\frac{r_a}{r_g} = \mu$  (рис. 21). Анодный ток каскада

$$i_a = \frac{-E_{an} + \mu U_{av} + U_{T\delta}(1 + \mu)}{R_a + R_i + r_a}. \quad (30)$$

Схема реагирует только на положительный сигнал, температурная нестабильность не компенсирована; можно применять только триоды, у которых  $\mu$  почти не зависит от  $i_a$ .

**Параллельно-балансный каскад** представляет собой ламповый мост, в котором скомпенсированы многие источники нестабильности ( $\Delta E_a$ ,  $\Delta E_{\text{нак}}$  и т. д.). Схема очень стабильна, применяется в ответственных следящих системах (рис. 22а).

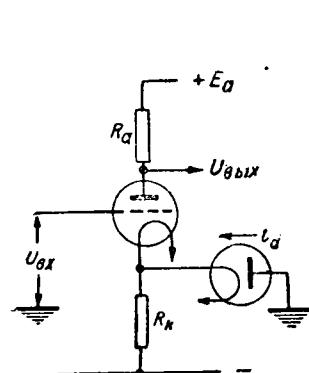


Рис. 20а.

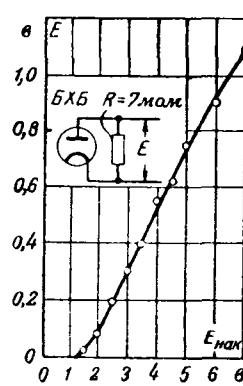


Рис. 20б.

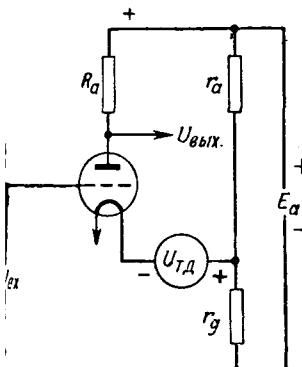


Рис. 21.

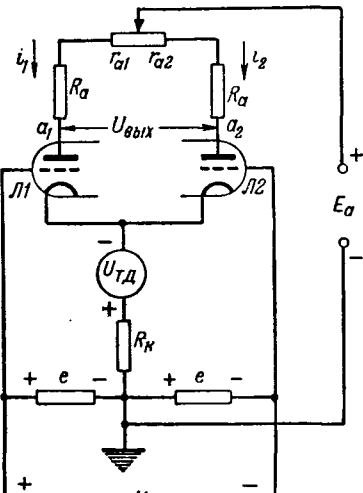


Рис. 22а.

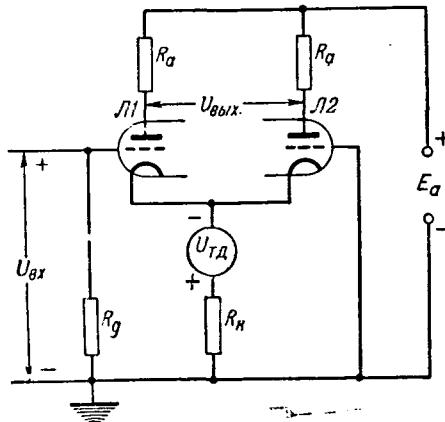


Рис. 22б.

Токи ламп составляют:

$$i_{1,2} = \frac{E_a - E_{an} + U_{T\vartheta}(1+\mu)}{R_a + R_i + 2R_k(1+\mu)} + \frac{\mu U_{ex}}{2(R_a + R_i)}. \quad (31)$$

Усиление схемы:

$$K = \frac{-\mu \cdot R_a}{R_a + R_i}, \quad (32)$$

оно не зависит от  $R_k$ , так как  $U_k = (i_{a1} + i_{a2})R_k$  не зависит от  $U_{ex}$ ; ток, отбираемый от источника анодного питания, не зависит от  $U_{ex}$ .

**Асимметричный, параллельно-балансный каскад** (рис. 22б) отличается тем, что усиление его входной лампы больше, чем усиление его второй лампы с заземленной сеткой; ток, отбираемый от источника  $E_a$ , зависит от  $U_{ex}$ ; усиление определяется равенством (32);  $U_k = f(U_{ex})$ ; анодные токи определяются уравнениями

$$i_{a1} = \frac{E_a - E_{an} + U_{T\vartheta}(1+\mu)}{Z + A} + \frac{\mu U_{ex} Z}{Z^2 - A^2}, \quad (33)$$

$$i_{a2} = \frac{E_a - E_{an} + U_{T\vartheta}(1+\mu)}{Z + A} - \frac{\mu U_{ex} A}{Z^2 - A^2}, \quad (34)$$

где  $Z = R_a + R_i + R_k(1+\mu)$ ;  $A = R_k(1+\mu)$ ; схема работает стабильно; ее допустимые сигналы меньше, чем в симметричной схеме.

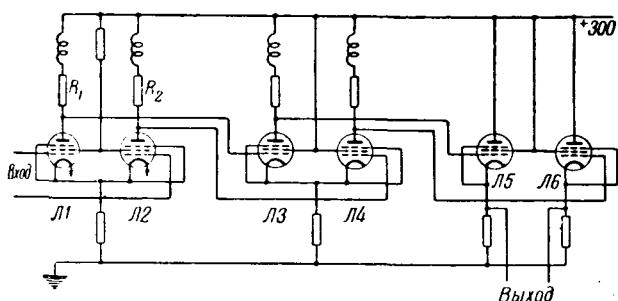


Рис. 23.

**Каскадное соединение параллельно-балансных схем** (рис. 23). Аноды первого каскада непосредственно присоединены к сеткам второго; режим класса А обеспечивается тем, что велики  $R_{a1}$  и  $R_{k2}$ . Небольшие индуктивности в анодах расширяют частотную характеристику до  $0,8 \cdot 10^6$  Гц и более. Паразитных связей через источник анодного питания, нет потому что общий анодный ток каждого каскада не зависит от его входного сигнала. Схема работает очень устойчиво и надежно.

**Серийно-балансный каскад** (рис. 24) имеет малую нестабильность. Его лампы соединены последовательно, выход снимается с анода нижней лампы и со средней точки делителя. Анодный ток равен:

$$i_a = \frac{E_a - 2E_{an} + \mu U_{ex} + 2(1+\mu)U_{T\vartheta}}{2[R_i + R_k(1+\mu)]}. \quad (35)$$

Усиление составляет:

$$K_0 = -\frac{\mu}{2}. \quad (36)$$

Схема особенно стабильна; токи обеих ламп равны и при изменении сигнала  $U_{T\vartheta}$  обоих катодов изменяются одинаково. Для триодов  $\mu \neq f(i_a)$ , поэтому усиление получается неизмен-

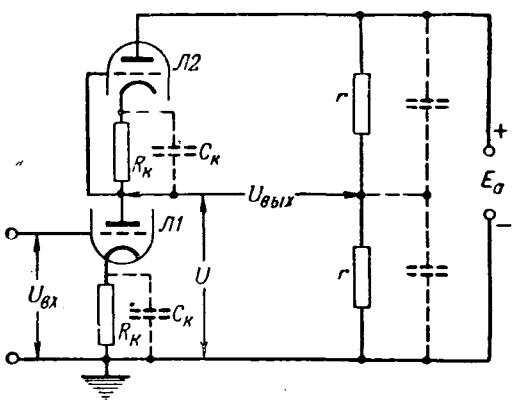


Рис. 24.

ное. Выходное напряжение не зависит от значительных изменений  $E_a$  и  $E_{\text{нак}}$ . Если зашунтировать  $R_k$  большими емкостями  $C_k$ , то частотная характеристика расширяется до 100 кГц и выше: ширина полосы частот

$$\Delta f = \frac{1}{\pi C_0 R_i}. \quad (37)$$

**Трехполюсные усилители постоянного тока** применяются в схемах моделирования систем регулирования, в счетно-решающих устройствах и т. п., они имеют выходное напряжение, равное нулю в отсутствии сигнала, общий полюс входа и выхода, общее анодное питание. В табл. 2 приведены параметры трехполюсных и других нагруженных усилителей. Если в схемы трехполюсных усилителей включить большие емкости, показанные в табл. 2 пунктиром, то частотные характеристики усилителей расширяются. Усилители, приведенные на рис. 27 и 28, узкополосные потому, что их выходная емкость есть сумма емкости источника анодного питания на землю и входной емкости следующего каскада. Если внутреннее выходное сопротивление усилителя мало, он может отдать значительную мощность в нагрузку. Наименьшее выходное сопротивление получается у повторителей, которые будут рассмотрены в дальнейшем.

**Дифференциальный усилитель (вычитатель)** отличается тем, что его выходное напряжение пропорционально разности двух входных напряжений (рис. 32). Если помехи, поступающие из цепей обоих источников сигнала, находятся в фазе, то они ослабляются в схеме вычитателя в сотни и даже тысячу раз. Выходное напряжение вычитателя линейно даже при больших входных сигналах. Температурная нестабильность оказывается мало. Коэффициенты усиления составляют:

$$K_1 = \frac{dI_3 R_a}{dU_1} = \frac{\mu_1}{R_{i1} + \left[ \frac{1+\mu_1}{1+\mu_2} \right] \left[ 1 + \frac{R_2}{R_a} \right] + \frac{R_{i1}(R_a+R_{i2})}{R_a R_k(1+\mu_2)}}, \quad (38)$$

$$K_2 = \frac{-\mu_2}{1 + \frac{R_{i2}}{R_a} + \frac{R_{i1}}{R_a} \left[ \frac{(1+\mu_2)}{1+\mu_1+\frac{R_{i1}}{R_k}} \right]}, \quad (39)$$

или, если параметры ламп одинаковы, то

$$K_1 = \frac{\mu}{1 + \frac{2R_i}{R_a} + \frac{R_i(R_a+R_i)}{R_a R_k(1+\mu)}}, \quad (40)$$

$$K_2 = \frac{-\left[ \mu + \frac{\mu}{(1+\mu)} \frac{R_i}{R_k} \right]}{1 + \frac{2R_i}{R_a} + \frac{R_i(R_a+R_i)}{R_a R_k(1+\mu)}}. \quad (41)$$

Если  $R_k$  велико, то  $K_2$  стремится к  $-K_1$  и подавление помех улучшается.

Выходное напряжение вычитателя

$$dU_{\text{вых}} = K_1 dU_1 + K_2 \cdot dU_2 = \\ = \left[ \frac{K_1 - K_2}{2} \right] [dU_1 - dU_2] + [K_1 + K_2] \left[ \frac{dU_1 + dU_2}{2} \right]. \quad (42)$$

Идеальный вычитатель реагирует только на разность входных сигналов; схема будет тем ближе к идеальной, чем коэффициент  $\frac{K_1 - K_2}{2}$  будет больше коэффициента  $K_1 + K_2$ . Для рис. 3:

$$\xi = \frac{K_1 + K_2}{K_1 - K_2} \cong -\frac{R_i}{R_k(1+\mu)}. \quad (43)$$

Чтобы уменьшить  $\xi$ , нужно брать большое  $R_k$ ; однако, при этом анодные токи ламп уменьшаются и возрастают внутренние сопротивления  $R_i$  ламп. Нужно большое  $R_k$ , которое и уменьшает анодные токи. Искомая характеристика получается, если вместо  $R_k$  включить лампу неизменного тока (рис. 33), для которой

$$\xi = \frac{-R_i}{(1+\mu) Z_k} \cong \frac{-R_i}{(1+\mu)^2 R_k + (1+\mu) R_i}, \quad (44)$$

если все три лампы имеют одинаковые параметры. Если  $R_k = \infty$ , то благодаря различию  $\mu$ -ламп  $\xi \neq 0$ , именно:

$$\xi \approx \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_1 \cdot \mu_2}. \quad (45)$$

С двойным триодом 6Н9 можно получить  $\xi \leq 0,001$ . Величина  $\xi$  представляет собой коэффициент ослабления помех, поступающих на входы с одинаковой фазой. Другими словами,  $\xi$  есть отношение усиления схемы при замкнутых между собой сетках к усилиению схемы, когда сигнал включается между сетками.

Вместо применения лампы неизменного тока для гашения помех можно использовать делитель с ослаблением  $\gamma$  в цепи сетки усилительной лампы Л2 и, таким образом, получить  $K_2 \gamma = -K_1$ . Когда входные сигналы лампы — порядка 1 мв — питание накала переменным напряжением невозможно потому, что фон из цепи подогрева поступает к катодам и образует напряжение помехи на  $R_k$ , т. е. на входах вычитателя. Указанный недостаток исключается, если заземлить катоды ламп (рис. 34), для которых при указанных параметрах  $K_2 = 12$ ,  $\xi = 0,0032$ . Накал можно питать переменным напряжением даже при малых входных сигналах. Вычитатель используется также в качестве нуль-индикатора.

**Приложение.** Для краткости изложения все расчетные формулы были приведены без выводов, которые основаны на использовании уравнения (12) анодного тока лампы. В качестве примера рассмотрим расчет схемы рис. 25, табл. 2. Для первой лампы этой схемы

$$U_{a1} = E_a - (i_1 - i_h) R_a - (i_1 + i_2) R_k, \quad (46)$$

$$U_{g1} = e - (i_1 + i_2) R_k, \quad (47)$$

Таблица 2

## Параметры нагруженных усилительных каскадов постоянного тока

№ по нр.	Название схемы	Изображение схемы	Усиление каскада	Внутреннее сопротивление каскада
25	Симметричный параллельно-балансный каскад		$\frac{\mu}{1 + \frac{R_i}{R_a} + \frac{2R_i}{R_h}}$	$\frac{2R_a \cdot R_i}{R_a + R_i}$
26	Асимметричный параллельно-балансный каскад		$\frac{\mu}{1 + \frac{R_i}{R_a} + \frac{2R_i}{R_h}}$	$\frac{2R_a R_i}{R_a + R_i}$
27	Трехполюсный параллельно-балансный каскад		$\frac{-\mu}{1 + \left( \frac{1}{R_a} + \frac{2}{R_h} \right) (R_i + A)}$	$\frac{2(R_i + A)}{1 + \frac{R_i + A}{R_a}}$ $A = R_k(1 + \mu)$
28	Трехполюсный серийный каскад		$\frac{-\mu}{2 + \frac{r + R_i + R_k(1 + \mu)}{R_h}}$	$\frac{r + R_i + R_k(1 + \mu)}{2}$
29	Трехполюсный каскадируемый параллельно-балансный каскад		$\frac{-\mu}{\left(1 + \frac{Z}{R}\right) \left[ 1 + \left( \frac{Z}{R_h} + \frac{Z}{R_1 + R_a} \right) \times \left( 1 + \frac{1}{1 + \frac{Z}{R}} \right) \right]}$ $R_1 = \frac{R \cdot R_a}{R + R_a}$	$\frac{Z}{1 + \frac{Z}{R_1 + R_a}}$ $Z = R_i + R_k(1 + \mu)$
30	Трехполюсный каскадируемый серийный каскад		$\frac{-\mu}{\left(1 + \frac{Z}{R}\right) \left[ 2 + \frac{1}{R_h} \left( r + \frac{Z}{1 + \frac{Z}{R}} \right) \right]}$	$\frac{1}{2} \left[ r + \frac{Z}{1 + \frac{Z}{R}} \right]$ $Z = R_i + R_k(1 + \mu)$
31	Трехполюсный серийный усилитель, каскадируемый межкаскадными делителями		$\frac{-\mu}{2 + \frac{E_a}{E_g} \cdot \frac{1}{(1 + pCR_1)} + R_0}$ $p = \frac{d}{dt}$	$\frac{R_1}{1 + pCR_1} + \frac{Z}{2}$ $Z = R_i + R_k(1 + \mu)$

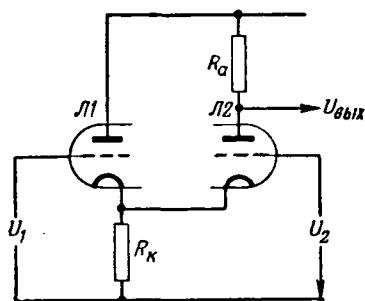


Рис. 32.

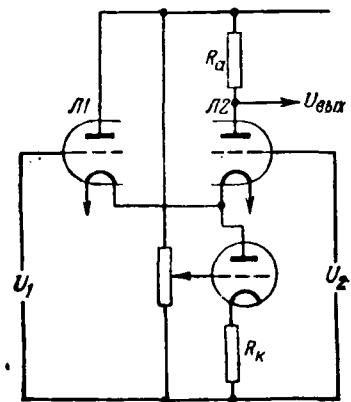


Рис. 33.

$$e = \frac{U_{бых}}{2}.$$

Следовательно,

$$i_1 Z_1 + i_2 A - i_h R_a = E_1,$$

где

$$Z = R_a + R_g + R_k (1 + \mu),$$

$$A = R_k (1 + \mu),$$

$$E_1 = E_a - E_{an} + \mu e.$$

Для второй лампы:

$$U_{a2} = E_a - (i_2 + i_h) R_a - (i_1 + i_2) R_k,$$

$$U_{g2} = -e - (i_1 + i_2) R_k$$

$$i_1 A + i_2 Z + i_h R_a = E_2,$$

где

$$E_2 = E_a - E_{an} - \mu e.$$

Из обхода верхнего контура

$$(i_1 - i_h) R_a = (i_2 + i_h) R_a + i_h R_h$$

или

$$i_1 R_a - i_2 R_a - i_h D = 0,$$

где

$$D = 2R_a + R_h.$$

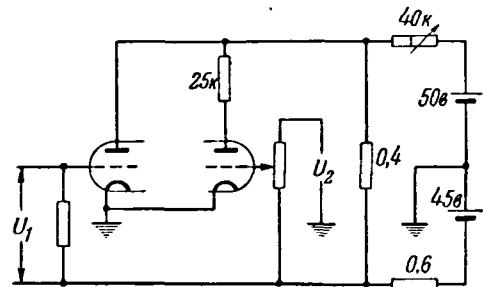


Рис. 34.

Из равенства (49), (55) и (58) находим:

$$i_h = \frac{\begin{vmatrix} Z & A & E_1 \\ A & Z & E_2 \\ R_a - R_a & 0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} Z & A - R_a & 0 \\ A & Z - R_a & R_a \\ R_a - R_a - D \end{vmatrix}} =$$

$$= \frac{Z \begin{vmatrix} Z & E_2 \\ -R_a & 0 \end{vmatrix} - A \begin{vmatrix} A & E_1 \\ -R_a & 0 \end{vmatrix} + R_a \begin{vmatrix} A & E_1 \\ Z & E_2 \end{vmatrix}}{Z \begin{vmatrix} Z & R_a \\ -R_a & -D \end{vmatrix} - A \begin{vmatrix} A & -R_a \\ -R_a & -D \end{vmatrix} + R_a \begin{vmatrix} A - R_a \\ Z & R_a \end{vmatrix}} =$$

$$= \frac{ZR_a E_2 - AR_a E_1 + AR_a E_2 - ZR_a E_1}{-Z^2 D + ZR_a^2 + A^2 D + AR_a^2 + AR_a^2 + ZR_a^2} =$$

$$= \frac{\mu U_{бых}}{R_h R_i + \frac{R_h}{R_a} + 2R_t}.$$

Следовательно, усиление схемы равно:

$$K = \frac{d U_{бых}}{d U_{бых}} = \frac{d i_h R_h}{d U_{бых}} =$$

$$= \frac{\mu}{1 + \frac{R_t}{R_a} + \frac{2R_t}{R_h}}.$$

Внутреннее сопротивление схемы между ее выходными зажимами равно напряжению холостого хода, деленному на ток короткого замыкания

$$R_{бых} = \frac{U_{бых}}{i_{бых}} = \frac{2R_a R_t}{R_a + R_t}.$$

Таким же методом выполнены расчеты всех остальных схем.

#### Литература

1. А. И. Берг. Теория и расчет ламповых генераторов, 1935.
2. J. W. Gray. Direct current amplifiers, p. 416, v. I. Rad. Eng. M. T. I.

## Профессор В. Н. Степанов

К 60-летию со дня рождения

Владимир Николаевич Степанов родился в 1889 г. в Москве. После окончания в 1914 г. Московского высшего технического училища, он заведовал городской электрической станцией в Симбирске, а с 1916 г. до 1935 г. работал на московской электростанции в Мосэнерго, занимая последовательно должности: заведующего районной кабельной сетью, заведующего подстанцией, заведующего службой защиты линий и консультанта отделения кабельной сети.

В 1921 г. В. Н. Степанов начал преподавать в высшей школе (Институт народного хозяйства им. Плеханова) и в 1922 г. получил звание профессора. Обобщая свой производственно-технический опыт В. Н. Степанов в 1925 г. выпустил в свет книгу «Электрические линии и сети». С 1930 г. В. Н. Степанов переходит в Московский институт механизации и электрификации сельского хозяйства им. Молотова, где работает заведующим кафедрой «Производство и распределение электроэнергии в сельском хозяйстве» и деканом факультета электрификации. В продолжении 18 лет он плодотворно трудится в этом институте.

В 1933 г. В. Н. Степанов написал книгу «Расчет электрических сетей», которая пользуется заслуженной



популярностью. Вскоре им был издан задачник по электрическим сетям. В 1940 г. совместно с Б. В. Кулешевым, он издал книгу «Сооружение и эксплуатация кабельных сетей», являющуюся до сего дня незаменимым пособием для инженеров и студентов, специализирующихся в этой области.

Будучи крупным специалистом по вопросам передачи и распределения электроэнергии, В. Н. Степанов много внес в дело теоретического изучения электрических сетей, практического их осуществления и подготовки кадров для электрификации сельского хозяйства.

В. Н. Степанов является разносторонне образованным человеком неутомимой энергии, чутко откликающимся на запросы современности, горячо любящим свое дело и учащуюся советскую молодежь.

Отмечая 60-летие со дня рождения и 35-летие инженерной и научно-педагогической деятельности В. Н. Степанова, необходимо подчеркнуть большую пользу, принесенную им делу электрификации нашей страны.

**Действительный член Академии сельскохозяйственных наук им. Ленина М. Г. ЕВРЕИНОВ  
Кандидат сельхоз. наук, доц. И. А. БУДЗКО**



## Профессор С. А. Бургучев

К 60-летию со дня рождения

Степан Артемьевич Бургучев родился в конце 1888 г. в Тифлисской губернии.

Будучи студентом III курса МВТУ, С. А. Бургучев участвовал в проектировании районной электростанции им. Классона. Окончив МВТУ, С. А. Бургучев одним из первых электротехников начинает с 1920 г. заниматься вопросами сельской электрификации в Наркомземе и в Московском земельном отделе. В 1922 г. он перешел в Электротехнический трест Центрального района (ЭТЦР). По его проектам и под его руководством было электрифицировано много фабрик и заводов.

С. А. Бургучев является пионером применения стальных проводов в распределительных сетях. В 1924 г. им опубликована работа «Электрический расчет стальных проводов», помогшая использовать сталь при электрификации сельского хозяйства и способствовавшая снижению расходов цветных металлов при ее проведении. Опубликованная С. А. Бургучевым работа «Монтаж трансформаторов и уход за ними» является настольной книгой для электротехников-монтажников. Разработка проектов электрооборудования и электроснабжения Метрополитена и Дворца Советов—



велась при ближайшем участии и руководстве со стороны С. А. Бургучева.

В 1923 г. Ломоносовский институт привлек С. А. Бургучева к работе в качестве профессора на кафедре электрических станций. С 1930 г. он перешел во вновь организованный Московский институт механизации и электрификации сельского хозяйства им. Молотова, в котором преподает до настоящего времени. Многолетняя инженерная и научно-педагогическая деятельность С. А. Бургучева является образцом преданного служения делу электрификации СССР. Сотни инженеров-электриков в разных концах нашей Родины с благодарностью вспоминают любовное отношение, с которым С. А. Бургучев воспитал из них высококвалифицированных специалистов.

В день 60-летия со дня рождения и 35-летия инженерно-технической и научно-педагогической деятельности С. А. Бургучева электротехническая общественность выражает уверенность в дальнейшей плодотворной работе юбиляра в области электрификации сельского хозяйства Советского Союза.

**Доктор техн. наук, проф. М. Ф. ПОЯРКОВ  
Кандидат техн. наук, доц. П. Ф. СКВОРЦОВ**



# Всесоюзная научно-техническая сессия по вопросам применения электроэнергии в сельскохозяйственном производстве

22—27 июля 1949 г. в г. Киеве состоялась Всесоюзная научно-техническая сессия по вопросам применения электроэнергии в сельскохозяйственном производстве.

Сессия была создана министерствами сельского хозяйства СССР и УССР, Всесоюзным научным инженерно-техническим обществом энергетики (ВНИТОЭ), Академией наук УССР с участием представителей министерств сельхозов СССР и УССР, министерства сельхозмашиностроения СССР, Всесоюзного института электрификации сельского хозяйства (ВИЭСХ), Всесоюзного института сельскохозяйственного машиностроения (ВИСХОМ) и других организаций.

В работе сессии принимали участие научные работники, инженеры, конструкторы, руководители областных контор Сельэлектро и передовых электрифицированных колхозов и совхозов. Всего 138 делегатов — представителей от 60 областей, краев и союзных республик.

С вступительным словом выступил вице-президент Академии наук Украинской ССР Е. О. Патон.

С докладом «Государственное социалистическое планирование сельской электрификации» выступил заместитель министра сельского хозяйства УССР П. И. Богдашкин. Содержание доклада изложено в статье П. И. Богдашкина, напечатанной в настоящем номере журнала.

Главный инженер Главсельэлектро Министерства сельского хозяйства СССР А. М. Саркисян в докладе об опыте применения электрической энергии в сельском хозяйстве и ближайших задачах по ее внедрению в сельскохозяйственное производство отметил, что незначительная загрузка сельских электроустановок и слабое внедрение электроэнергии в процессы сельскохозяйственного производства объясняется, главным образом, недостаточным вниманием к этому делу и отсутствием необходимой популяризации электродвигателя, как наиболее надежной и экономичной машины в колхозном производстве.

Выпускаемые промышленностью сельскохозяйственные машины, как правило, не рассчитаны на привод от электрических двигателей. Электромашиностроительные заводы не выпускают специальных типов электродвигателей, рассчитанных для применения в сельском хозяйстве (тихоходные, с малыми пусковыми токами и т. д.). В заключение докладчик остановился на мероприятиях, которые необходимо провести в целях обеспечения массового внедрения электроэнергии в сельское хозяйство.

С докладом «Научно-технические принципы внедрения электричества в сельское хозяйство» выступил действительный член Всесоюзной академии сельскохозяйственных наук им. Ленина М. Г. Евреинов (МИМЭСХ).

Докладчик заявил, что одной из наиболее важных и большой по удельному весу и значению задач в производственных процессах сельского хозяйства является проблема разработки рационального электропривода сельскохозяйственных машин. Из этой общей проблемы вытекает ряд частных, крайне важных задач. Предстоит пересмотр всех типов стационарных сельскохозяйственных машин и реконструкция их в целях использования преимуществ электроэнергии. Необходимо найти наиболее простые и целесообразные соединения электродвигателя с существующими типами сельскохозяйственных машин.

Необходимо создание системы электрифицированных орудий для комплексного использования их в колхозах и совхозах. Большой научной проблемой является непосредственное применение электричества в технологических процессах сельского хозяйства.

Докладчик сказал, что углубленное исследование сельскохозяйственных машин и электропривода и определение их энергетических показателей составляют комплексную задачу таких институтов, как МИМЭСХ,

ВИЭСХ, ВИСХОМ в тесном содружестве с работниками практики.

С докладом «Комплексная электрификация, как фактор повышения эффективности сельскохозяйственного производства» выступил кандидат техн. наук А. А. Краснов (ВИЭСХ).

Отметив быстрый количественный рост сельской электрификации в последний период, докладчик подчеркнул, что качественное содержание сельской электрификации пока еще далеко не соответствует потребностям сельскохозяйственного производства и быта. Значительно большая эффективность применения электроэнергии получается в условиях комплексной электрификации, т. е. при широком и рациональном внедрении электроэнергии во все процессы сельскохозяйственного производства и быта, где использование ее более выгодно или целесообразно по сравнению с другими видами энергии.

Доктор техн. наук П. Н. Листов (Энергетический институт им. Кржижановского АН СССР) сделал доклад о принципах электрификации полеводства на базе электротрактора, электрокомбайна и других подвижных машин.

Разработанная в Энергетическом институте им. Кржижановского АН СССР схема комплексной электрификации сельского хозяйства, с ее основным звеном — электрическим трактором, рассматривается как научная основа использования электроэнергии в сельском хозяйстве и анализируется с точки зрения технических, эксплуатационных и экономических возможностей, открывающихся с ее реализацией по сравнению с современной тракторной схемой энергетики сельскохозяйственного производства. Докладчик рассказал о десятилетнем опыте эксплуатации советских электротракторов в Энгельской МТС, Саратовской области, который подтверждает, что с помощью электротрактора электроэнергия может значительно глубже войти в производственные процессы. В конце доклада участникам сессии был показан документальный фильм «Электрический трактор».

С докладом «Комплексная электрификация производственных процессов в животноводстве» выступил инж. Г. В. Горновесов (Запорожский филиал ВИЭСХ). Кандидат техн. наук М. Е. Кулик (ВИЭСХ) сделал доклад об электрификации производственных процессов в коромысловом приготовлении на колхозных животноводческих фермах, а кандидат техн. наук В. И. Смирнов (ВИЭСХ) — о применении в животноводческих хозяйствах электротепловых приборов.

Докладчики отметили, что в трехлетнем плане развития общественного колхозного и совхозного продуктивного животноводства партия и правительство приняли мероприятия по ликвидации отставания в электрификации и механизации животноводства — одной из трудоемких отраслей сельского хозяйства. В докладах выдвинуты требования к разработке рабочих машин, электропривода и электроборудования для животноводческих ферм, а также рекомендуемый набор машин, в зависимости от размеров хозяйства, и изложены основные мероприятия по расширению внедрения электроэнергии на животноводческих фермах.

С докладом «Рациональный электропривод сельскохозяйственных машин и требования к сельскохозяйственному и электромашиностроению» выступил кандидат техн. наук Г. И. Назаров (МИМЭСХ). Докладчик выдвинул два направления по внедрению электропривода сельскохозяйственных машин: 1) приспособление электропривода к существующим сельскохозяйственным машинам без особой их переделки; 2) реконструкция существующих и создание новых электрифицированных сельскохозяйственных

шин в комплексе с электроприводом, пересмотр скоро-  
го исполнительных механизмов, учет специфических ус-  
ловий сельскохозяйственного производства и электроснаб-  
жения. Второе направление выдвигается главным для  
 дальшего развития электропривода в сельском хозяйстве. Выдвинуты определенные требования к сельскохозяй-  
ственному машиностроению и электромашиностроению.

Доклад «Электропривод сельскохозяйственных машин, выпускаемых мини-  
стерством сельского хозяйства и сельского ма-  
шиностроения СССР» сделал кандидат техн. наук  
А. Колясин (ВИСХОМ).

Кандидат сель.-хоз. наук Н. А. Сазонов (ВИСХОМ) сде-  
лал доклад «О применении в сельском хо-  
зяйстве короткозамкнутых асинхрон-  
ных двигателей с прямым включением». У-  
словия сельской электрификации в отличие от электри-  
фикации промышленности характеризуются соизмеримо-  
стью мощностей источников электроэнергии и ее прием-  
ников. Поэтому включение в сеть электродвигателей оказы-  
вает резкое влияние на режим работы электростанции,  
и в свою очередь оказывается на пуске и на устойчи-  
тии работы подключенных к сети двигателей. Доклад-  
ник указал на методы правильного выбора мощности  
электродвигателя и необходимые мероприятия, облегчаю-  
щие применение короткозамкнутых электродвигателей в  
сельском хозяйстве.

Кандидат техн. наук Л. В. Цукерник (Институт элек-  
тroteхники АН УССР) в докладе «Компаундиро-  
вание синхронных генераторов сель-  
ских электростанций» показал, что компаундиро-  
вание генераторов от нормальных трансформаторов тока  
(през. возбудитель) является весьма простым и надежным  
способом улучшения рабочих характеристик сельских  
электростанций. Компаундирование дает возможность осу-  
ществлять запуск короткозамкнутых двигателей, соизмеримых  
по мощности с генератором.

С докладом «Организация ремонта элек-  
трических машин и аппаратов в сель-  
ском хозяйстве» выступил доцент А. П. Репетин  
(академия промэлектротехники КОНИТОЭ).

С сообщениями выступили: инж. В. Е. Одинцов (Укр-  
электро) — об электрификации в поиме-  
ни Ирпень, Киевской области; инж.  
М. Олейник (Запорожский филиал ВИСХОМ) — о при-  
менении электричества в хозяйстве  
пищевого грунта; инж. Н. С. Зимбалевский  
(Укрэнерго) — об опыте электрификации  
хлозов Украина ССР; председатель  
хлоза «Здобуток Жовтня», Тальновского района, Киев-  
ской области, депутат Верховного Совета ССР Ф. И.  
Бровецкий — об опыте применения элек-

троэнергии в колхозе; директор племсовхоза  
«Червоний шахтар», Днепропетровской области, И. Г.  
Касьянин — об опыте электрификации сов-  
хоза.

Сессия уделила большое внимание вопросам состав-  
ления схем развития сельской электрификации республик,  
краев и областей.

С. В. Щуров (ВИСХОМ) сделал доклад о методи-  
ческих основах составления схемы ис-  
пользования местных энергетических  
ресурсов для электрификации сель-  
ского хозяйства. С докладом об опыте со-  
ставления Генеральной схемы развития  
сельской электрификации Украинской  
ССР выступил инж. С. Н. Кудин (Укрсельэлектропро-  
ект). Инж. Г. С. Квачев (Запорожский филиал ВИСХОМ)  
сделал доклад «Нормативы потребления  
электроэнергии в сельском хозяйстве  
и методы подсчета нагрузок».

Доклад «Роль местных энергетических  
ресурсов в развитии сельской элек-  
трификации» сделал инж. Л. С. Хилобоченко (Укр-  
сельэлектропроект). Он отметил, что результаты изучения  
вопроса о получении электроэнергии в любой точке Укра-  
инской ССР, где есть местные энергетические ресурсы,  
независимо от наличия крупных промышленных элек-  
тростанций, позволяют считать местные электростанции перво-  
очередными источниками энергоснабжения для сельской  
электрификации.

Кандидат техн. наук В. Г. Холмский (Институт теп-  
лоэнергетики АН УССР) выступил с докладом «Целе-  
сообразные пределы охвата электрифици-  
руемого сельскохозяйственного района».

На заключительном заседании сессии с докладом  
«Механизация строительно-монтажных  
работ» выступил кандидат техн. наук М. В. Луговской  
(ВИСХОМ). Докладчик рассказал о разработанных Инсти-  
тутом предложениях по механизации работ на строите-  
льстве сельских электростанций. Основной производственной  
единицей предлагается строительно-монтажная станция  
(СМС), снабженная необходимыми строительно-монтаж-  
ными механизмами и приспособлениями.

В обсуждении докладов приняли участие заместитель  
министра сельского хозяйства ССР Н. Г. Наумов, член-  
корр. Академии наук Армянской ССР А. Г. Иосифян,  
проф. С. А. Бургачев и другие — всего более 30 человек.

Участники сессии обратились с приветствием к вождю  
народов И. В. Сталину. Сессия послала письмо с излож-  
ением итогов своей работы секретарю ЦК КП(б) Ук-  
раины Н. С. Хрущеву.

**Инж. Д. Т. КОМАРОВ**



## В Ленинградском электротехническом институте им. Ульянова (Ленина)

В июне с. г. в Ленинградском электротехническом  
институте им. Ульянова (Ленина) состоялась научно-тех-  
ническая конференция, в работе которой приняли участие  
представители промышленности, научно-исследовательских  
институтов и вузов. Участники конференции заслушали  
61 доклад.

Открывая конференцию, заместитель директора ЛЭТИ  
по техн. наук, проф. С. А. Ринкевич подчеркнул зна-  
ние науки в решении задач народнохозяйственного пла-  
на, основанного на задачах дальнейшего укрепления со-  
трудства научных работников Института с работниками  
промышленности и выразил пожелание, чтобы конферен-  
ция послужила средством взаимной информации представ-  
ителей науки и производства.

На пленарном заседании В. М. Барашенков (кафедра  
марксизма-ленинизма) сделал доклад «Марксист-

ско-Ленинское учение о партийности в  
науке»; член-корр. АН ССР, проф. В. П. Вологдин  
выступил с докладом «Перспективы развития  
техники высоких частот и применения в  
промышленности»; доклад «Фотоэлектри-  
ческий метод измерения предельно-  
малых э. д. с. и перспективы его приме-  
нения и развития» был сделан кандидатом техн.  
наук, доц. Б. П. Козыревым; доктор техн. наук, проф.  
Н. П. Богородицкий представил доклад «Электриче-  
ская прочность керамики и стекол». На  
заключительном пленарном заседании с докладом «Основы  
построения схем следящего привода»  
выступил доктор техн. наук, проф. Д. В. Васильев. В док-  
ладе «Ультразвуковой микроскоп» доктор  
техн. наук, проф. С. Я. Соколов рассказал о принципах

построения и работы прибора, позволяющего с помощью ультразвуковых колебаний вести наблюдение частиц малых размеров в среде, непроницаемой для света.

В радиотехнической секции были обсуждены доклады: доктора техн. наук, проф. С. И. Панфилова «Определение начальных постоянных устанавливающегося процесса по способу наименьших квадратов для электрических цепей с распределенными постоянными»; кандидата техн. наук, доц. Ф. Е. Евтеева «Детекторный приемник массового производства методом печатания»; кандидата техн. наук, доц. И. В. Бренева «О влиянии метеорологических условий на прохождение УКВ»; доц. И. Н. Валеянова «Теория и расчет катодного детектора»; кандидата техн. наук, доц. Е. И. Маньева «Фазосравнивающие устройства»; проф. Я. А. Рыфтина «К вопросу о коррекции телевизионных изображений»; кандидата техн. наук, доц. О. Б. Лурье «О свойствах переходных характеристик усилителей видеочастот»; кандидата техн. наук, доц. Г. С. Рамма «Расчет тока в диоде на с. в. ч.»; инженера В. А. Волгова «О некоторых особенностях расчета маломощных силовых трансформаторов для радиоустройств».

В секции электронной техники кандидат техн. наук, доц. А. А. Потас сделал доклад «Измерение времени дейтерионизации»; доц. К. В. Стакорский — «Применение электрического нагрева в технологии электровакуумного производства»; инж. Л. Б. Красильщикова — «Фотоэлектрический компенсатор перекоса уточной нити для ширмовых машин»; кандидат техн. наук, доц. Ю. А. Кацман — «Явления взаимодействия переменных электронных потоков с электрическим полем»; инж. Э. И. Голованевский — «Сравнительная оценка возможности использования в качестве предварительного усилителя электроннолучевых усилителей сантиметрового диапазона»; инж. В. П. Панов — «Опыты по изучению оксидных катодов в импульсном режиме».

В секции электрических машин, электропривода и энергетики были заслушаны доклады: «Переходные процессы в сложных системах возбуждения электрических машин» доктора техн. наук, проф. Н. П. Ермолина; «Пусковые и реверсивные характеристики гребного синхронного двигателя» доктора техн. наук, проф. В. Т. Касьянова; «Расчет динамических характеристик сварочных генераторов постоянного тока» кандидата техн. наук, доц. И. С. Зарецкого; «Применение тензорного исчисления к анализу динамики электроприводов» кандидата техн. наук А. В. Башарина;

О помощи, оказываемой учеными промышленности, было рассказано в докладе инж. В. Д. Барышникова «Электронные регуляторы и результаты их работы на бумажных машинах Союза ССР». В докладе приведено описание наивысших практических промышленных применение на бумкомбинатах ССР электронных и электронно-машинных регуляторов напряжения, скорости и соотношения скоростей секционных двигателей бумагоделательных машин (в том числе регулятора с частотным измерителем) и регулятора мощности (подачи) непрерывных дефибреров, разработанных Ленинградским отделением Электропрома при помощи кафедры «Электрификация промпредприятий» ЛЭТИ.

Инж. И. Г. Штольцер представил доклад «Методика расчета параметров авторегулируемых систем», кандидат техн. наук, доц. К. В. Булгаков — доклад «Современные проблемы энергоснабжения промышленных объектов», в котором рассмотрел вопросы экономии электрической энергии и топлива в промышленном энергопотреблении.

В секции были обсуждены также доклады: доц. В. Н. Шевцова «Режимы электростанций при сооружениях водного транспорта»; кандидата техн. наук, доц. Б. И. Архангельского «Автоматический регулятор напряжения»; кандидата техн. наук Г. С. Филиппова «Вопросы устойчивости силовых синхронно-следящих систем»; инж. Г. С. Чериорукского «Об одном методе анализа устойчивости работы электрического привода».

В секции техники высоких напряжений и электроизолирующих материалов обсуждался доклад доктора техн. наук, проф. В. И. Иванова «Расчет электромагнитов постоянного тока». О реальной помощи автозаводам страны сообщил кандидат техн. наук, доц. В. В. Пасынков в докладе «Методы испытаний и пути повышения качества керамики автомобилей». Доклад кандидата техн. наук Д. В. Шишмана был посвящен теме: «Новый метод оценки качества изделий с применением теории вероятностей»; инж. М. В. Курлина — теме: «Стабилизация жидких для электриков антиокислителями»; кандидата техн. наук, доц. Ю. Я. Юров сделал доклад «Прибор с прямым отсчетом для измерения энергии горения дуги»; кандидат техн. наук П. И. Матханов и инж. Ю. А. Розовский — «Пробо воздуха между врачающимися электродами»; инж. Р. К. Манакова — «Новые типы квадраторов из стекла»; инж. А. Л. Игрицк «Исследование электродинамической устойчивости и гашения электрической дуги в автоматических выключателях железной дугогасительной решеткой».

На электрофизической секции кандидат техн. наук Я. П. Ковалевская сделала доклад «Вероятность обратного зажигания в ртутных выпрямителях при последовательном соединении».

В работе секции приняли участие сотрудники кафедры высшей математики, посвятившие свои разработки проблемам электротехники и физики. Кандидат физ.-мат. наук, доц. Д. А. Добротин сделал доклад «Приложение метода источников к теории распространения волн в кабеле»; инж. А. Лунц — «Применение алгебраических методов к исследованию релейно-контактных систем не параллельно-последовательного типа»; доктор техн. наук, проф. Н. Г. Бондырев — «Приложение геометрии Лобачевского к теории цвета» и др.

В секции приборостроения и автоматики с докладом «О творческом сотрудстве работников науки и промышленности по приборостроению» выступил директор завода Н. А. Ефимов, освещивший основные вопросы, которые промышленности по приборостроению ставит перед работниками науки.

Кандидат техн. наук, доц. Р. И. Юргенсон выступил с докладом «Структурные узлы современных устройств телеуправления»; кандидат техн. наук, доц. Л. И. Байда — с докладом «Методы повышения стабильности усилителей постоянного тока»; кандидат техн. наук, доц. В. П. Мержвинский — «Исследование ударных реакций в контакторах переменного тока»; кандидат физ.-матем. наук, доц. В. С. Мочалин — «Две теоремы о гироинтеграторах» и кандидат техн. наук, доц. П. И. Сайдов «Решение одной нелинейной задачи гиростабилизации».

В связи с совпадением конференции с Всесоюзной сессией по электроприборостроению на последнюю были вынесены доклады: доктора техн. наук А. В. Фримена «Современные тенденции в развитии техники телемеханики»; кандидата техн. наук Д. Л. Оршансского «Некоторые вопросы электрической пирометрии» и кандидата техн. наук, доц. Н. Н. Разумовского «Поперечное магнитное поле в постоянном магните».

На заседаниях секции социально-экономических наук были заслушаны доклады: М. С. Левина «Оборачиваемость обротных средств на предприятиях электро- и металлопромышленности Петроградского района»; кандидата историч. наук, доц. П. Д. Кузьмина «Учение арктизма—ленинизма о базисе и надстрой-

ках»; Д. М. Лебедева «Экономическая роль социалистического государства»; кандидата экон. наук, доц. Е. М. Виленкиной «Государственно-монополистический капитализм на современном этапе» и др.

*Кандидат техн. наук А. В. БАШАРИН*



## Анатолий Яковлевич БУЙЛОВ

10 августа 1949 г. после тяжелой болезни скончался Анатолий Яковлевич Буйлов—профессор, доктор техн. наук, зав. кафедрой «Электрические аппараты» и декан электромеханического факультета Московского энергетического института им. Молотова.

Анатолий Яковлевич родился в 1911 г. в деревне Задки Кимрского района Калининской области в семье речевьянина. В 1919 г. окончил учительскую семинарию в г. Торжке и получил звание народного учителя. В 1920 г. поступил в Московское высшее техническое училище на тяготехнический факультет.

Еще будучи студентом, в 1927 г. начал работать в ГЭЭИ (ныне ВЭИ) качестве техника. По окончании ВГТУ был зачислен на должность аучного сотрудника, а затем и старшего научного сотрудника ВЭИ. Параллельно с работой в ВЭИ с 1929 г. начал педагогическую деятельность, преимущественно в МЭИ, начиная ассистентом, с 1931 г.—ассистентом, а с 1940 г.—профессо-

ром, зав. кафедрой Электрических аппаратов. С 1943 г. он был назначен деканом Электромеханического факультета.

В 1937 г. А. Я. Буйлову без защиты диссертации присвоена учченая степень кандидата технических наук, старшего научного сотрудника и доцента. В 1940 г. Анатолий Яковлевич защитил докторскую диссертацию и получил учченую степень доктора технических наук и звание профессора.

Анатолий Яковлевич много сделал в развитии теории практики работы автоматических мощных выключателей и энергосистем. Им впервые было доказано, что процесс восстановления напряжения на выключателе зависит не только от постоянных цепей, но и от сопротивления тягового промежутка. Анатолием Яковлевичем также было первые открыто, что влияние емкости, шунтирующей выключатель, не однозначно. Свои работы по теории гашения дуги переменного тока он сопровождал рядом практических мер, направленных к улучшению высоковольтных выключателей.

В 1933 г. Анатолием Яковлевичем была предложена специальная конструкция решетки масляного дутья, сильнее уменьшающая время работы выключателя и увеличивающая его надежность. Эта конструкция нашла широкое применение в сетях Мосэнерго, Донэнерго и др., а с 1943 г. начала применяться в США.

Работы Анатолия Яковлевича по методике испытаний высоковольтных выключателей и по искусственным схе-



мам являются уникальными и наиболее полными. Анатолий Яковлевич первым дал теоретический анализ и практические формулы, позволяющие правильно определить величину шунтирующего сопротивления для выключателя.

Вместе с тем Анатолий Яковлевич проводил теоретические и экспериментальные исследования в области электромагнитных механизмов. Еще в 1935 г. им был разработан новый метод расчета тяговой силы электромагнита постоянного тока, дающий большую точность расчета, по сравнению с существующими методами.

В 1947 г. А. Я. Буйловым были закончены большие исследования по методике расчета тяговых электромагнитов. Он нашел новую функцию распределения поля в электромагнитах, уточнил энергетический баланс электромагнита и на основании этого создал новый метод расчета тяговых электромагнитов.

Высокой оценки заслуживают работы Анатолия Яковлевича по вопросу перенапряжений при отключении электрических цепей. В этих работах им впервые были рассмотрены процессы перенапряжений с учетом явлений в дуговом промежутке.

За время своей педагогической деятельности в МЭИ А. Я. Буйлов читал курсы: «Коммутационные аппараты», «Синхронные машины», «Аппаратура управления», «Аппаратура распределительных устройств» и «Основы электроаппаратостроения».

Анатолий Яковлевич вел большую общественную работу: он являлся председателем научно-технического общества МЭИ им. Молотова, членом экспертной комиссии ВАК, был членом ряда комиссий и комитетов, как в системе Министерства высшего образования, так и в промышленности. В период выборов в Верховный и местные Советы был членом окружной избирательной комиссии, доверенным лицом и т. д.

Анатолий Яковлевич является автором четырех крупных изобретений, пяти книг и более чем 30 журнальных статей.

А. Я. Буйлов был награжден медалями «За трудовую доблесть», «За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941—1945 гг.» и «В память 800-летия Москвы».

В лице Анатолия Яковлевича Буйлова советская наука и промышленность потеряли крупного ученого-инженера, а советская высшая школа — талантливого педагога.

*Е. П. Апаров, М. А. Бабиков, Б. К. Буль, В. А. Голубцова, А. А. Глазунов, К. А. Круг, В. С. Кулебакин, А. Н. Ларионов, Н. Е. Лысов, В. В. Мешков, Г. Н. Петров, Л. И. Сиротинский, П. В. Сахаров, Ф. С. Сметаников, М. Г. Чиликин.*



# Библиография

**СПРАВОЧНИК ПО ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА.** (Главное управление сельской электрификации Министерства сельского хозяйства СССР. Всесоюзный научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства). Авторский коллектив: В. И. Андрианов, И. А. Будзко, А. Г. Захарин, А. П. Златковский, А. А. Климов, А. А. Краснов, М. Е. Кулик, М. И. Ми хайлов, Д. Л. Рябинов, Н. А. Сазонов, А. А. Шатан, Е. Л. Шац, М. И. Шидарев, В. А. Шустов, С. В. Щуров и Л. Е. Эбин. Научные редакторы: академик М. Г. Евреинов, доктор техн. наук, проф. М. Ф. Поярков, проф. В. Н. Степанов, кандидат сел.-хоз. наук М. Е. Бейлис, инж. А. М. Саркисян. Составители: кандидат сель-хоз. наук Н. А. Сазонов и инж. И. М. Шидарев. 598 стр. ц. 24 руб. Сельхозгиз, 1949 г.

В послевоенной пятилетке электрификация сельского хозяйства получила особенно широкий размах. В соответствии с принятым Советом Министров СССР в мае 1948 г. решением «О плане развития сельской электрификации на 1948—1950 гг.» мощность сельских электроустановок возрастет к концу 1950 г. почти до 2 млн. квт, против 270 тыс. квт к началу послевоенной пятилетки. К концу пятилетки должны быть обеспечены электроэнергией все совхозы, машино-тракторные станции и мастерские, селекционные и опытные сельскохозяйственные станции и свыше 56 тыс. колхозов.

К сожалению, техническая литература по вопросам сельской электрификации выпускалась до настоящего времени в совершенно недостаточном количестве. Выход в свет обстоятельного «Справочника по электрификации сельского хозяйства» несомненно будет встречен энергетиками и в первую очередь сельскими электрифициаторами с большим удовлетворением.

Справочник содержит 6 разделов: I — Общая часть, II — Сельские электростанции, III — Распределение электрической энергии, IV — Применение электричества в сельском хозяйстве, V — Ремонт электрических машин и трансформаторов и VI — Краткие указания по составлению планов, смет, отчетности и тарификации электрической энергии. Таким образом, в справочнике охвачен весь комплекс вопросов по проектированию, монтажу и эксплуатации сельских электроустановок. Это — цепное пособие для инженеров и техников, занимающихся вопросами сельской электрификации.

Приходится, однако, высказать сожаление о том, что некоторые помещенные в Справочнике материалы несколько устарели и ряд важных вопросов, связанных с новыми техническими путями развития сельской электрификации страны, не нашел в нем отражения. Это вызвано тем, что материал для издания справочника был сдан авторским коллективом в 1945—1946 гг., а справочник выпущен издательством лишь в 1949 г. Поэтому этот ценный справочник, дополненный новыми данными, должен быть в возможно короткий срок переработан и выпущен вторым изданием.

Именно поэтому мы считаем необходимым остановиться, во-первых, на вопросах, которые по нашему мнению следовало бы дополнительно включить в справочник и во-вторых, на справочном материале, который в настоящее время по тем или иным причинам уже устарел и должен быть исключен или переработан.

Справочник начинается с общих справочных сведений, без всякого введения. Нам думается, что следовало бы в краткой вводной части изложить основные организационные и технические пути развития сельской электрификации, вытекающие из важнейшего постановления Совета Министров СССР от 29 мая 1948 г. «О плане развития сельской электрификации на 1948—1950 гг.» и ряда других важных постановлений Правительства по вопросам сельской электрификации и развития отраслей социалистического сельского хозяйства.

В справочнике ничего не сказано об основных положениях по разработке республиканских, краевых и областных схем использования местных энергетических ресур-

сов для сельской электрификации. Не затронут также вопрос о проектировании местных сельских энергосистем, создаваемых на базе кустования каскадов гэс, объединения в общей сети работы сельских гэс с тепловыми электростанциями и, наконец, объединения местной сельской энергосистемы с районными и другими несельскими электростанциями и энергосистемами. Нам кажется правильным затронуть в справочнике такие вопросы как обоснование наивыгоднейшего радиуса охвата потребителей от заданного генерирующего источника или питательной трансформаторной подстанции при том или ином направлении линии электропередачи.

Ничего не сказано о ветроиспользовании и существующих типах ветродвигателей и ветроэлектростанций.

Весьма слабо отражены в справочнике вопросы автоматизации сельских электростанций. Не нашли отражения вопросы механизации строительных и монтажных работ на сельских электроустановках; не затронуты вопросы организации работ и применения лучших форм организации труда с учетом специфики строительства сельских гидроэлектростанций методом народных строек.

Хорошо было бы поместить в спрощочнике перечень сети строительно-монтажных, эксплоатационных и проектных контор и трестов Главсельэлектро, специализированных высших и средних учебных заведений и школ, а также научно-исследовательских учреждений.

Приведено очень мало нормативов расхода материалов на конструктивные элементы сооружений, стоимости этих элементов сооружений; нет хотя бы основных укрупненных справочных норм и расценок на производство работ.

Следовало бы привести раздел, посвященный эксплуатации сельских электроустановок.

Переходим ко второму вопросу — об устаревших материалах, помещенных в справочнике, а также к отдельным замечаниям по главам справочника.

В таблицах изолированных проводов и кабелей (стр. 76—77) пропущены шланговые провода, необходимые для передвижных электродвигателей и мобильных электрифицируемых процессов сельскохозяйственного производства. На стр. 78 указано, что в воздушных линиях высокого напряжения применяются однопроводолочные алюминиевые провода сечением 16 мм<sup>2</sup>, что противоречит «Правилам устройства электротехнических установок» 1948 г.

На стр. 88—90 приведены габариты зданий тепловых электростанций, причем не предусмотрены распределительные устройства высокого напряжения. Газогенераторные электростанции следовало бы дать с габаритами применительно к современным двигателям типа 2Гч—45 л. с. и 4Гч — 90 л. с.

На стр. 106—114 приведены устаревшие, снятые с производства гидротурбины (ВТ, ГТ и др.), но не показаны новейшие гидротурбины, включенные в нормальную номенклатуру производства наших заводов. Деревянные пропеллерные турбины системы профессора Соколова (стр. 128—129) рекомендовать для сельских гидроэлектростанций нецелесообразно, так как в настоящее время наша промышленность в совершенно достаточной мере

беспечивает сельское гидроэлектроустройство металлическими турбинами. Ничего не сказано об автоматических регуляторах скорости гидротурбин и, в частности, о регуляторах системы Котенева, которыми наша промышленность укомплектовывает гидротурбины ПРК-70.

Отсутствуют данные и чертежи гидрогенераторов так называемой I—IV Уральской серии, авторы которых удоены Сталинской премии в 1949 г. Генераторы этих типов в большом количестве поставляются для сельских

Не приведены распространенные схемы коммутации якоря генератор-трансформатор и схемы для параллельной работы в местной энергосистеме с фидерами связи. В § 25 следовало бы показать распределительный щит с шаратурой для синхронизации, а также распределительный щит с автоматизацией; на щитах не показаны стотомеры. В § 26 следовало бы привести компоновку крытого распределительного устройства электростанции типовыми ячейками современных масляных выключателей и т. п.

В разделе III (стр. 199) показана трансформаторная ячейка подстанции АП-образного типа, между тем для трансформаторов мощностью до 50 квт следовало бы показать облегченную конструкцию подстанции П-образного типа. Это особенно важно для безлесных районов. На стр. 215—217 показаны устаревшие, снятые с производства типы масляных выключателей и, наряду с этим, не указанные новейшие типы выключателей ВМБ и ВМГ. На стр. 222 показаны автоматические коробки КАМ, также яные с производства, и не показаны выпускаемые промышленностью приводы РВА. На стр. 272 указано, что в напряжении до 1000 в минимально допускаемое расстояние проводов от земли по населенной местности составляет 6 м вместо 5 м по «Правилам устройства электротехнических установок» 1948 г. На стр. 278—279 показана термитная сварка клещами стальных проводов тык, не разрешаемая нормами, а на стр. 280 — бандажировка скрутка Оргрэс, — также не допускаемая (для линий скрепленного напряжения).

В § 20 рекомендуется применять для напряжения 6 кв изоляторы, маркированные на 6 кв, а для 3—6 кв — экскаваторные изоляторы типа ТФ и АИК, что разрешается лишь в условиях военного времени.

В § 21 (стр. 284—286) приведены рисунки устаревших типов опор.

На рис. 100 показан подъем обычной одностоечной опоры бригадой в 7 чел. по единым нормам времени до-

статочно 5 чел. Отсутствует специальная глава по столь важному вопросу как антисептирование опор.

В главе 14 было бы уместно дать характерные графики суточных нагрузок по сезонам года и объяснить методологию их составления.

В разделе V следовало бы добавить главу по уходу за сельскими воздушными электрическими сетями.

Раздел VI устарел. Постановлениями Совета Министров СССР за 1949 г. установлен новый порядок рассмотрения и утверждения проектов сельской электрификации и новый порядок финансирования государственных сельских электростанций. Руководящие указания по проектированию сельских электроустановок изданы в 1949 г. Главсельэлектро в переработанном издании.

Перечисленные замечания не могут, однако, уменьшить большие достоинства «Справочника по электрификации сельского хозяйства», который по существу может явиться настольной книгой для сельского электрифициатора-инженера и техника, проектировщика и прораба, мастера, десятника и бригадира.

Следует отметить полноту справочного материала раздела I. Весьма ценный материал для проектировщика имеется в разделе II. После внесения в этот раздел новых типов оборудования и исключения устаревших типов — пользование данными этого раздела значительно облегчит труд проектировщиков и в большой мере будет способствовать повышению качества проектов сельских электростанций.

В разделе III, кроме материалов для проектирования, приведены очень ценные данные для строителей и монтажников по всему комплексу вопросов распределения электрической энергии.

Применение электричества в сельском хозяйстве отражено в разделе IV всесторонне, с полным охватом всех процессов сельскохозяйственного производства, где электроэнергия может быть внедрена с достаточной эффективностью.

В целом авторы справочника вполне справились со своей задачей. Сельские электрифициаторы будут признательны авторскому коллективу за составленный ценный «Справочник по электрификации сельского хозяйства».

Будем надеяться, что Сельхозгиз в самое ближайшее время обеспечит выпуск второго, переработанного издания Справочника по электрификации сельского хозяйства.

Я. С. ТГПЛИЦКИЙ  
Начальник технического отдела Главсельэлектро  
Министерства сельского хозяйства СССР



## В. И. КОРОЛЬКОВА и Я. К. РОЗОВСКИЙ. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ.

Учебные таблицы. 23 таблицы, ц. 60 руб. Госэнергоиздат, 1948.

В подзаголовке рецензируемого издания указано, что состоит из «учебных таблиц», но не указано, на кого таблицы рассчитаны. Только часть таблиц стоит на месте подготовки электромонтера; в большинстве же они трактуются более или менее сложные вопросы, касающиеся к «Правилам устройства электрических установок», в том числе 9 таблиц посвящено «Правилам устройства заземлений». В этих таблицах приводятся краткие формулы, усвоение которых требует квалификации ниже техника.

Вместе с тем в «Таблицах» оговоренно не затронуты некоторые виды работ, с которыми электромонтер повседневно встречается (кабельные сети, ртутно-жировые и аккумуляторные установки и др.). Другие важные виды работ освещены явно недостаточно (воздушные линии, распределительные устройства и др.).

Как по охвату материала, так и по характеру изложения, «Таблицы» не могут служить пособием также и студентов техникумов и, тем более, для студентов. «Таблицы» приходится рассматривать лишь как материал по технике безопасности, который не может

претендовать на какую-либо целеустремленную законченность. Польза от «Таблиц» существенно снижается из-за многих недостатков. Мы остановимся сначала на недостатках общего характера.

Естественным назначением данных таблиц, несомненно, является использование их в качестве демонстрационного материала. Между тем, это крайне затруднено из-за недостаточного масштаба таблиц и не соответствующего назначению сорта бумаги. «Таблицы» могут быть применены лишь для постоянной демонстрации их путем вывешивания в клубах, «уголках техники безопасности» и т. д. Для многократного использования в разных местах они непригодны.

Таблицы содержат много материалов, имеющих лишь косвенное отношение к «Технике безопасности». Например: а) данные по проводам (табл. 2) и каталожные данные по осветительным арматурам (табл. 5); б) каталожные данные по электродвигателям (табл. 9). Площадь многих таблиц, хотя бы и не вызывающих возражений с точки зрения тематики, также используется нерационально. Так, в табл. 4, посвященной устройству

местного освещения, сверлильный столик, который служит исключительно для того, чтобы изобразить на нем светильник местного освещения, занимает до 75% площади таблицы. К тому же станок изображен более детально, чем электрооборудование, которому посвящена таблица. В табл. 3 переносная лампа изображена в излишне большом масштабе.

Во многих таблицах иллюстрации выполнены настолько неудачно, что мысль автора не доходит до читателя (табл. 2 — верхний правый рисунок; табл. 5 — нижний рисунок; табл. 8 — рисунки в центре, заключенные в кружок; табл. 13 — правый верхний рисунок и др.).

Имеются несоответствия между подписями и содержанием рисунков. В подписи к правому нижнему рисунку табл. 2 следовало говорить о «голых токоведущих частях»; в табл. 13 на левом среднем рисунке указано, что все соединения подземной части (подразумевается заземлитель) должны быть выполнены надежной сваркой, а на рисунке приведено болтовое соединение. Встречаются также нарушения ГОСТ на обозначения.

Включить в ограниченный объем рецензии все замечания, которые вызывают отдельные таблицы, не представляется возможным. Ниже приведена только часть этих замечаний.

Табл. 2. Открытая прокладка изолированных проводов допускается только при напряжении до 1 000 в, а не до 3 000 в, как это следует из материала таблицы. Нижний рисунок справа, зачинающий большую площадь, непонятен. Он не иллюстрирует содержание сделанной над ним надписи.

Табл. 3. Термин «пониженное напряжение» не должен применяться в том смысле, в каком он применяется в данной таблице. Следует говорить «малое» напряжение или же «безопасное» напряжение. Закрепление шнура и провода на роликах (нижние рисунки) выполнено неверно.

Табл. 4. Таблица практически не иллюстрирует надписей; если бы рисунок убрать вовсе, то педагогический эффект таблицы пострадал бы очень незначительно. Обязательному заземлению подлежат только кожух трансформатора и металлические трубы проводки первичного го напряжения.

Табл. 5. В подписи под левым нижним рисунком, на котором изображена лампа накаливания, говорится о возможности применения для целей освещения напряжения выше 250 в. На самом деле, системой с наивысшим допускаемым напряжением для осветительной сети, питающей лампы накаливания, является система 380/220 в. В помещениях с повышенной опасностью и особо опасных не допускаются не только шнуровые, но и блочные подвесы.

Табл. 6. В промышленных установках отнюдь не обязательно, чтобы предохранители защищали провода и приемники от опасных перегрузок. Смену предохранителей под напряжением следует производить с помощью изолированных клещей, а не непосредственно рукой, хотя бы и защищенной резиновой перчаткой. Пластиначатые предохранители, как конструкцию уже не изготавливающиеся заводами, весьма недорогие и даже опасную в эксплуатации, приводить не следовало.

Табл. 7. Очевидно, что в подписи к правому верхнему рисунку речь идет о сверлилке, работающей при напряжении свыше (а не до) 40 в. Именно поэтому и предусмотрена изоляция человека от земли.

Табл. 10. Не указано весьма существенное требование к рубильникам, установленным вне электромашинных помещений. Они должны безопасно отключать (а не только пропускать) свой nominalный ток. Кроме того, они должны безопасно включать также пусковые токи, что очень важно при использовании их в качестве пускателей для короткозамкнутых двигателей.

Табл. 11. Рисунок, иллюстрирующий требования к пересечениям между кабелями сильного тока и кабелями связи, не имеет отношения к таблице с подзаголовком «Воздушные провода и наружные устройства». Следует изъять таблицу наименьших сечений проводов по условиям прочности, так как она содержит чисто проектный справочный материал.

Табл. 12. Удельное сопротивление выражается не в ом/см, а в ом·см. Формула для сопротивления расте-

канию трубы относится к случаю, когда верхний конец трубы совпадает с уровнем земли. На рисунке изображен случай, когда он находится ниже уровня земли. Возникновение серьезной опасности при одновременном прикосновении к незаземленному корпусу, содержащему замыкание на землю, и к другому «хорошо заземленному» предмету мало зависит от распределения потенциала на участке растекания тока. Опасность «одного» прикосновения, изображенного в таблице (рук — рука — нога), велика в основном потому, что сопротивление пути тока через тело в землю сводится к сопротивлению тела и подошвы обуви, а сопротивление пола исключается. При пути тока в теле рука — рука остается только сопротивление тела, т. е. исключается только пол, но и обувь. Именно последний случай тем самым было выбран для иллюстрации его соответствующим рисунком, потому что он и наиболее вероятен и наиболее опасен. Рисунок, иллюстрирующий значел «коэффициента прикосновения» (левый средний), дающее преувеличенное представление о роли этого фактора. В практике заземлитель очень редко примыкает к земленому корпусу. В большинстве случаев он находится от него на расстоянии нескольких метров и даже десятков метров. Фактически коэффициент прикосновения чаще всего близок к единице.

Табл. 13. Рисунок (верхний левый) согласно подписи должен иллюстрировать зависимость сопротивления заземлителей от сопротивления почвы. На самом деле здесь приведены сопротивления растеканию заземлителя для трех частных случаев, причем опущено важное указание на величины удельных сопротивлений, принятых авторами при расчетах. Следовало ясно указать, что на диаграммах верхнего правого рисунка изображены коэффициенты сезонности. Этот коэффициент, однако, никаких условиях не может быть равен нулю, как это указано на диаграмме справа для полосовых заземлителей, помещенных на глубине 0,8 м. Неверно, что заземление должно производиться «во всех установках с напряжением проводов по отношению к земле выше 150 в». Это требование, как правило, не относится, например, к жилым помещениям.

Табл. 15. В сетях с наглухо заземленной нейтралью не только четырехпроводных с заземленным нейтральным проводом, но и трехпроводных (без нулевого провода) защитное заземление не должно применяться. Вряд ли в СССР вообще можно встретить трехфазную сеть с нейтральным проводом, но с заземленной нейтралью трансформатора. Табл. 15 следует рассматривать не только как лишнюю, но и как нежелательную.

На табл. 14, 15 и 16 помещен один и тот же рисунок, занимающий весьма значительную площадь, но содержащий никакого сколько-нибудь ценного демонстрационного материала.

Табл. 17. Диаграмма левого среднего рисунка и правильна: напряжение прикосновения, достигнув нуля, меняет свой знак. Не следует противопоставлять нулевому проводу «рабочим» проводам. Вообще, правильнее говорить не «рабочие», а «фазные» провода. Под «рабочими» проводом понимается такой, который ведет ток для питанием приемников. К числу таких проводов может признаться не только фазный, но также нулевой провод. Подпись под правым средним рисунком не отвечает содержанию рисунка. На нем изображен только обрыв нулевого провода, но не соединение его с фазным проводом. Что касается самой диаграммы, то она соответствует рисунку. Совершенно непонятно, какое назначение имеется параллельное присоединение к нулевому проводу сопротивления 5 ом (нижние рисунки — левый и правый). Авторы допускают ошибку: значительные напряжения, относящиеся к земле возникают в трехфазных сетях только при резком неравенстве сопротивлений изоляции различных фаз, но отнюдь не при неравномерной нагрузке трехфазной цепи (левый нижний рисунок). Следует указать, что в условиях, изображенных на правом нижнем рисунке, человек окажется под фазным напряжением при наличии обрыва нулевого провода отнюдь не во всех случаях, а лишь в случае прикосновения к корпусу зануленного, но не имеющего хорошего соединения с землей приемника.

Табл. 18. И здесь без надобности помещен все тот же рисунок, который имеется и на табл. 14, 15 и 16. В СССР система «защитного отключения» не применяется; соответствующие автоматы заводами электропромышленности не изготавляются и не намечены к изготавлению. С нашей точки зрения возбуждает сомнение даже рациональность широкого применения системы «защитного отключения». Вводить в «Таблицы» эту систему не следовало.

Табл. 20. В подписи указывается, что после срабатывания пробивного предохранителя происходит автоматическое выключение масляного выключателя. Между тем, на практике такая схема не применяется. Она не приведена также и в таблице.

Табл. 21. На правом верхнем рисунке резиновый коврик подостлан слишком далеко от рабочего места монтера. На резиновых изолирующих ботах и перчатках следовало изобразить обязательные для них штампы о дате испытания. Кстати, в таблице уместно было бы поместить сроки периодических испытаний. Рисунок сумки с набором нормального монтажного инструмента не имеет отношения к тематике данной таблицы.

Табл. 23. Здесь необходимо было привести рисунки приставных лестниц, подмостей и подвесных лесов, отвечающих требованиям техники безопасности.

**Выводы.** В настоящее время существует только один вид демонстрационных материалов по технике безопасности — плакаты, иллюстрирующие безопасные методы производства монтажных и эксплуатационных операций. Авторами выдвинута идея создания демонстрационных материалов также и для популяризации сведений в области вопросов, входящих в правила устройства электрических установок. Идея эта заслуживает одобрения. Таблицы, подобные рассматриваемым, могли бы быть полезны при чтении лекций и докладов, если бы они были свободны от недостатков, перечисленных выше.

Использовать таблицы или плакаты для самостоятельного изучения более или менее сложных вопросов нецелесообразно; наилучшим решением является популярная, но строго научная книга, снабженная большим количеством хорошо подобранных по тематике и хорошо выполненных иллюстраций.

**Кандидат техн. наук, доц. Л. П. ПОДОЛЬСКИЙ**  
Всесоюзный заочный энергетический институт

**Инж. П. Ф. СОЛОВЬЕВ**  
Главэлектромонтаж Министерства строительства  
предприятий тяжелой индустрии



Дж. РЕЙХ. ТЕОРИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ. Перевод с английского А. П. Иевлева, В. В. Лобанова, А. А. Соколова и Б. М. Царева, под общей редакцией и с дополнениями Б. М. Царева, 939 стр., ц. 48 руб. Госэнергоиздат, 1948.

Начальной датой появления электронных и ионных приборов следует считать 1802 г., когда наш выдающийся соотечественник — профессор Медико-хирургической академии В. В. Петров впервые получил и исследовал электрическую дугу. Но широкое и быстрое развитие эти приборы получили только в начале двадцатого века, в результате достигнутых к тому времени значительных успехов физических наук, приведших к созданию электронной теории. Особенно большим стимулом для всестороннего развития этих приборов явилось их применение в радиотехнике: с 1904 г.—в качестве детекторов; с 1907 г.—качество усилителей и с 1913 г.—в качестве генераторов переменных токов низких и высоких частот.

За протекший после этого период времени электронные и ионные приборы прошли исключительно плодотворный путь своего развития. В настоящее время имеется уже областей техники, которые в целом основываются на их применении — радиотехника, а также дальняя радиосвязь, электроакустика, автоматика и телеуправление, техника всех видов преобразования электрических явлений (выпрямления и инвертирования токов, умножения и деления их частоты и т. п.), техника измерений любых очень малых величин и т. д. Проникновение электронных и ионных приборов в новые области техники продолжается и в настоящее время, всегда сопровождаясь открытием для этих областей новых и широких перспектив дальнейшего развития.

Естественно, что развитие электронных и ионных приборов и их применения вызвало появление обширной научно-технической литературы. При этом, в силу крайнего разнообразия как возникающих задач, так и методов их решения, эта литература уже около 20 лет назад начала разделяться на весьма значительное число (примерно 10—12) относительно самостоятельных научно-технических областей. Такая дифференциация, несомненно, необходимая во всех случаях углубленного решения специальных вопросов, создает неудобства и трудности как при общем ознакомлении с техникой электронных и ионных приборов, так и в тех случаях, когда подлежат решению сложные комплексные проблемы. Надо считать вполне назревшей задачу создания энциклопедического курса общего характера, имеющего своей целью осветить

на широкой научной и технической основе как теорию самих электронных и ионных приборов, так и их главнейшие технические применения. Поэтому появление перевода книги Г. Дж. Рейха, ставящей себе эти задачи, вызывает интерес и внимание.

Автор назвал свой курс «Теория и применения электронных приборов». Однако, это название неточно и не вполне соответствует принятой у нас терминологии.

Прежде всего, в книге совершенно не рассматриваются невакуумные электронные приборы. Не рассматриваются также и конкретные технические формы применения электронных и ионных приборов, т. е. рабочие схемы и численные зависимости у различных устройств с электронными и ионными приборами: радиопередатчиков, радиоприемников, выпрямительных устройств, приборов автоматики и телеуправления, ламповых высокочастотных нагревательных приборов и т. д. Термин «электронные приборы» в американской литературе является обобщающим, в то время как у нас он относится только к приборам с чисто электронным разрядом. Таким образом, содержание книги Рейха должно отвечать примерно такому названию: «Теория электронных и ионных вакуумных приборов и методов их технического применения».

Однако, и так сформулированное заглавие охватывает все еще чрезвычайно обширную область техники и ставит перед автором задачу объединить в одной книге основной теоретический материал, обычно излагаемый в четырех—пяти самостоятельных курсах. Рецензируемая книга фактически должна представлять собой тот энциклопедический курс теоретических основ техники электронных и ионных вакуумных приборов, о котором говорилось выше.

Что касается научного уровня и методики изложения материала в книге, то автор в своем предисловии к 1-му изданию курса определяет его следующим образом: «Хотя книга первоначально была рассчитана в качестве руководства для студентов университетов, все же автор надеется, что она окажется полезной и для инженеров в качестве справочной книги». Насколько автор достигает своей цели — будет ясно из дальнейшего.

Чувство неожиданности и несогласия вызывает принципиально высказывание редактора перевода книги —

Б. М. Царева, который начинает свое «Предисловие» следующими словами: «В советской литературе по электронным лампам основное место занимают учебники и учебные пособия по классической теории ламп, предназначенные для студентов вузов, техников и инженерно-технических кадров в области электросвязи. Значительно меньше книг по вопросам практического применения электронных ламп, работы их в схемах, особенно не для целей связи, а для различных областей техники».

Не отрицаю того, что у нас действительно есть весьма хорошие курсы по теории электронных и ионных приборов (В. Ф. Власова, А. А. Шапошникова), мы имеем все основания гордиться также развитием советской учебно-научной литературы и «по вопросам практического применения электронных ламп, работы их в схемах». Наши курсы по радиопередающим устройствам (А. И. Берга, З. И. Моделя и И. Х. Невяжского и др.), по усилительным и радиоприемным устройствам (В. И. Сифорова, Л. Б. Слепяна, Войшвилло и др.) не только не уступают заграничным, но и превосходят их. Несомненно, как научная и техническая литература в области электронных ламп и их применения, так и самое развитие соответствующей техники представлены в нашей стране весьма высоко и в качественном и в количественном отношении.

Таким образом, приведенное выше заключение редактора перевода никак не может вызвать одобрения. Может возникнуть предположение, что это высказывание продиктовано мыслью о том, что перевод книги Г. Дж. Рейха может заполнить какую-то брешь в советской научно-технической литературе. Но такое заключение было бы неверным. Подобной роли книга Рейха не выполняет.

Более обоснованно попутное указание редактора перевода на тот общеизвестный факт, что в нашей специальной литературе максимальное внимание уделяется вопросам применения электронных и ионных приборов в технике связи, особенно радиосвязи, другие же области их применения освещаются значительно слабее. Технические требования таких областей, как правило, менее сложны и удовлетворяются более простой аппаратурой, чем та, которая применяется в радиосвязи. Это вызывает и меньший интерес к ним авторов. Но, несомненно, появление у нас новых серьезных курсов, посвященных подобному применению электронных и ионных приборов, весьма желательно. Однако, в книге Г. Дж. Рейха новых материалов этого рода также не имеется.

Основное содержание книги делится фактически на восемь разделов и изложено в 15 главах.

I раздел — Теория электронных процессов в вакууме и электронных приборов (главы I—IV; всего 149 страниц).

II раздел — Усиление напряжений, токов и мощностей на низких и высоких частотах (главы V—VIII; всего 192 страницы).

III раздел — Модулирование и детектирование колебаний (глава IX; всего 86 страниц).

IV раздел — Пусковые импульсные схемы и генерирование колебаний (глава X; всего 107 страниц).

V раздел — Теория ионных процессов и ионных приборов с тлеющим и дуговым разрядами (главы XI—XII; всего 149 страниц).

VI раздел — Фотоэлементы (глава XIII; всего 52 страницы).

VII раздел — Выпрямление и выпрямительные устройства (глава XIV; всего 50 страниц).

VIII раздел — Электронные измерения и измерительные устройства (глава XV; всего 96 страниц).

Наконец, имеются «Приложения» с различными табличными данными и ответами на помещенные в тексте задачи (всего 26 страниц).

Раздел I начинается с установления физических понятий и основных законов движения электронов в вакууме. Этот материал изложен кратко и упрощенно. Так же упрощенно излагается и теория термоэлектронного излучения. Автор совершенно не рассматривает влияние на это излучение анодного напряжения и, таким образом, не выясняет особенностей характеристик оксидных и других «экономических» катодов. Серьезным недостатком этого раздела является также отсутствие численных показателей для основных параметров различных катодов: их эффективности, продолжительности службы и т. д.

Вовсе не рассмотрены карбонизированные ториевые катоды. Недостаточно выяснен «закон трех вторых» и электронного тока в вакууме. Нет формул для расчета токов эмиссии у тетродов и пентодов.

Перечисленные недостатки являются очень серьезными. Положительной стороной раздела является систематическое рассмотрение соотношений между токами напряжениями как в цепи анода, так параллельно и цепи управляющей сетки. Вообще же этот раздел книга написан значительно более упрощенно, чем в аналогичных советских курсах.

Раздел II посвящен вопросам лампового усиления. Материал этого раздела носит, в основном, описательный и практический характер, отсутствуют строгие выводы. Общий уровень изложения раздела тоже ниже принятого у нас в вузовых учебниках, но наличие многих материалов практического характера делают этот раздел в общем удовлетворительным и полезным.

В разделе III автор излагает материалы необычным образом, объединяя вопросы модулирования и детектирования колебаний высокой частоты и помещая их перед отделом генерирования. Благодаря этому, с одной стороны, облегчается рассмотрение в дальнейшем процессов генерирования колебаний, но, с другой стороны, обложняется изложение процессов их модулирования. Ни в этом разделе, ни в других главах книги нет конкретных указаний и данных о практических методах осуществления модуляции в радиопередающих устройствах. Хотя принципы анодной и сеточной модуляции рассматриваются в книге совершенно нет схем анодной модуляции и схем сеточной модуляции с использованием модулирующей лампы в качестве переменного сеточного сопротивления.

Вопросы детектирования даны лучше; в частности, неплохо изложен вопрос детектирования частотно-модулированных колебаний. Целесообразно сделанное редактором перевода дополнение (§ 9.27—9.30), посвященное принципам преобразования частоты колебаний в радиоприемных устройствах. Упущением переводчиков является отсутствие перечня литературы в конце этого раздела.

Лучше написан раздел IV, хотя отдельные места и здесь вызывают возражения. Приведенную на стр. 491 классификацию ламповых генераторов ни по содержанию, ни по терминологии, нельзя считать приемлемой, хотя самую попытку дать такую классификацию можно одобрить. Недостатком раздела является также применение готовых формул без их выводов, что делает зависимости физически мало понятными. Вообще расчетная часть раздела явно недостаточна. Очень мало разбираются вопросы последовательного и параллельного питания генераторов. Нет упоминания о камертонной стабилизации колебаний низких частот. Слишком кратко и поэтому практически бесполезно то, что говорится о генерировании ультравысокой частоты магнитронами и генераторами с тормозящим полем. Перечисленные недостатки значительно снижают ценность данного раздела.

В разделе V, при рассмотрении теории газового разряда, нет упоминания о теории плазмы Ленгмюира. Отдельные ионные приборы рассмотрены весьма неравномерно. Очень мало сказано о ртутных выпрямителях, газовых разрядниках и газосветных лампах. Но есть и удачно изложенный материал, например, о тиратронах и принципах их практического применения, а также об инвертировании электрических токов.

Раздел VI посвящен фотоэлементам. Здесь надо отметить существенное дополнение, написанное переводчиком, изложившим основные данные о советских фотоэлементах. Это тем более полезно, что весь оставшийся практический материал этого раздела написан в применении к американским типам фотоэлементов. Переводчик поместил также (на стр. 703) специальное, к сожалению слишком краткое примечание, посвященное работе А. Г. Столетова по фотоэлектрическому эффекту.

Весьма недостаточны математический анализ и численные зависимости, характеризующие работу фотоэлементов.

В разделе VII излагаются вопросы выпрямления. В отличие от других авторов, Рейх рассматривает теорию выпрямления в конце курса, что, несомненно, дает ей преимущества в отношении свободы трактовки всех во-

жов, связанных с применением электронных и ионных вентильных приборов. Материал раздела носит списанно-прикладной характер и может быть полезен при решении практических задач по выпрямлению тока, а также по сглаживанию и стабилизации выпрямленного напряжения.

Наконец, раздел VIII посвящен электронным измерениям и измерительным устройствам. Выбор материала и такого раздела, ввиду его обширности и внутреннего изобилия, не легок. В результате этот раздел книги вполне удачен. Приведенный материал не полон, в ряде пунктов является случайным и не имеет законченного рактера. Классификация ламповых вольтметров (стр. 805) явно неудовлетворительна.

Делает общее заключение о книге в целом, необходимо отметить как ее положительные стороны, так и те существенные недостатки, которые частью должны быть отнесены за счет автора, а частью за счет выполнения перевода.

Выше уже указывалось, что основной заслугой автора является сама попытка объединить в одной книге основной материал, обычно излагаемый в 4—5 курсах. Автор стремится ориентировать этот материал прежде всего в зону его практического применения и, в соответствии с этим, сообщает немало полезных практических сведений и указаний.

Заслуживает также одобрения разработка автором практических расчетных задач по различным отделам курса и помещение их в конце соответствующих глав. Несмотря на неравнозначность отдельных задач, их наличие, конечно, может способствовать глубине проработки материала курса.

Однако, книга имеет существенные недостатки. Прежде всего необходимо отметить непостоянство характера и уровня изложения различных вопросов книги. Разные части курса, даже различные вопросы вной и той же главе, излагаются весьма неодинаково. Книга часто материал сообщается чрезвычайно элементарно и упрощенно, но, на ряду с этим, бывает изложен весьма сложно. Встречаются места, где автор вначале общает только исходные условия и пишет основные дифференциальные уравнения, после чего сразу переходит к конечным результатам решения, смысл которых может быть понят и использован читателем только приловии, если он самостоятельно проделает сложные промежуточные вычисления.

Существенным недостатком книги является также отсутствие в ней многих материалов, необходимых практики даже при ограниченном изучении рассматриваемой части.

В книге применяются старые системы единиц. Имеются ошибки и опечатки. Основные численные величины параметры, известные с большой точностью (например, параметры электрона и т. п.), даются только приближенно, иногда с точностью только двух, в лучшем случае трех знаков.

В качестве иллюстративных примеров систематически приводятся расчеты, относящиеся к американским электрическим лампам. Разбор таких примеров, разумеется,

мало полезен советскому читателю. Мало удобны также приведенные в книге расчетные данные и графики, относящиеся к частоте 60 гц.

Что касается русского перевода книги, то необходимо отметить попытку переводчиков и редактора, при помощи специальных примечаний и дополнений, осветить хотя бы частично заслуги русских ученых и успехи советской промышленности в рассматриваемой области. К сожалению, приведенный в такой форме материал весьма недостаточен. Составлен перечень литературы на русском языке; однако, и это не сделано с достаточной полнотой и систематичностью. Например, непонятно отсутствие в перечне литературы по разделу усиления курсов В. И. Сибирькова и Л. Б. Слепяна по радиоприемным устройствам. Не дана литература по разделам детектирования и модуляции.

Переводчиками далеко не всегда используются устаревшие русские термины и без всякого основания применяются типичные американские термины, иногда даже в их английском произношении. Так в переводе сохраняется термин «плиотрон» вместо обычных слов «электронная лампа» или «лампа с чисто электронным разрядом». Сохраняются также такие ческоственные русскому языку термины как «дегенеративная схема», «паронаполненные приборы» и другие. Переводчики именуют ионитроны «игнайтранами», хотя это слово не имеет никакого отношения к английскому языку и происходит от латинского ignis — огонь и греческого tronos — прибор. Нередко термины, принятые в одной части книги, в другой ее части заменяются иными. В книге нет разработанной системы обозначений, и отдельные символы и условные обозначения передко имеют случайный характер. В переводе сохранено много ненужных иностранных наименований, как «схема Хартлея» и т. п.

В виде общего заключения об издании можно сказать следующее. Эта книга, энциклопедическая по своему характеру, несмотря на существенные недостатки, содержит материал, полезный для советского читателя. Поскольку одновременно этот весьма разносторонний материал объединен в одном курсе, книга представляет известные удобства как справочник, но характер изложения этого материала в значительной степени описательный, что с теоретической точки зрения делает его не полноценным. Все перечисленные выше недостатки не позволяют считать, что книга может полноценно выполнять назрелую задачу по созданию общего курса «Теория электронных и ионных вакуумных приборов и методов их технического применения».

Для создания такого объединенного энциклопедического курса, который и по охватываемому материалу и по характеру и глубине проработки теоретических и прикладных вопросов и по методам изложения полноценно удовлетворил бы потребности советских читателей, необходимо, чтобы он был написан коллективом советских авторов.

*Доктор техн. наук, проф. С. И. ЗИЛТИНКЕВИЧ  
Инж. И. В. ШАРОВ  
Ленинград*



## Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике

*(Издания 1949 г.)*

АЛЬСОВ И. СОВЕТСКОЕ РАДИО. 16 стр., беспл. Комитет делам культурно-просветительных учреждений при Совете министров АзССР (на азербайджанском языке).

\* АЛЕКСЕЕВ А. Е. КОНСТРУКЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН. Допущено в качестве учебного пособия для электротехнических и энергетических институтов. 391 стр., вклейка, 22 руб. 50 коп. Госэнергоиздат.

БЕРГ А. И., РАДОВСКИЙ М. И. ИЗОБРЕТАТЕЛЬ РАДИО С. ПОЛОВ. Издание 2-е, исправленное и дополненное. 136 стр., 3 руб. 75 коп. Госэнергоиздат.

БЕРДЧЕВСКИЙ Г. М. КОМПЕИСАЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ЦИСТИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ. Перевод И. Вимба. (Энергосбыт Латвии и Совет НИТО ЛССР). стр., цена не указана. Изд. «Циния» (на латышском языке).

БОГОРОДСКИЙ Г. И., ВАСИЛЬЕВ С. А., КЛЕБАНОВ Б. С. НОВАЯ ВВОДНО-КОММУТАЦИОННАЯ АППАРАТУРА ТЕЛЕФОННЫХ ЛИНЕЙНО-АППАРАТУРНЫХ ЗАЛОВ ДЛЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ. 67 стр. + 11 схем, п. 5 руб. Связьиздат.

ВАГОНЫ ТИПА В. Под редакцией Г. В. Федорова. (Московский метрополитен им. Кагановича). 269 стр. + вклейки, бесплатно. Трансжелдориздат.

Коллективный труд инженеров Г. В. Федорова, Л. С. Соколова, В. Д. Радченко, В. Н. Перевозского, В. И. Крылова, Г. Н. Куранова, М. И. Андрианова, В. Н. Каменева, А. П. Рогожина, С. М. Мизикова, В. И. Лукьянова, Ю. В. Филипповского и Г. Л. Рафаловича; предназначается для инженеров и ремонтного персонала Московского метрополитена им. Л. М. Кагановича. В книге дается описание электрической, пневматической и меха-

нической части подвижного состава типа В, эксплуатируемого на Московском метрополитене им. Кагановича и даются необходимые сведения по уходу за вагонами и по их ремонту.

**ВОЛЬМАН И. И. ТЕХНИКА САНТИМЕГРОВЫХ ВОЛН. Конспект лекций. (Всесоюзный заочный энергетический институт). 162 стр., цена не указана. Изд-во «Советское радио».**

\* **ВОСТРОКНОУТОВ И. Г. ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН (Комитет по делам мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР). 260 стр., ц. 17 руб. Металлургиздат.**

**ВСЕСОЮЗНАЯ НАУЧНАЯ СЕССИЯ, ПОСВЯЩЕННАЯ ПРАЗДНИКОВАНИЮ «ДНЯ РАДИО»—Москва, 1949. Аккредитации докладов (Общество им. Гопова), 92 стр., бесплатно. Связьиздат.**

**ГОФМАН И. В. ОСНОВЫ НОРМИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ. (Энергетический институт им. Кржижановского АН СССР и Ленинградский инженерно-экономический институт им. Молотова). 196 стр., ц. 6 руб. 50 коп. Лениздат.**

**ЗАЙМОВСКИЙ А. С., УСОВ В. В. МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ В ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ. Магнитные, проводниковые, реостатные и контактные материалы. Издание 2-е, заново переработанное и дополненное. 568 стр., + вклейки, ц. 32 руб. 50 коп. Госэнергоиздат.**

Фундаментальный труд лауреатов Сталинской премии, докторов техн. наук, профессоров А. С. Займовского и В. В. Усова представляет собой существенно переработанную книгу туже авторов, вышедшую первыми изданием в 1941 г. Как и в первом издании, в книге, главным образом, рассматриваются свойства и вопросы применения материалов; вопросы металлоутии и технологии излагаются лишь в той степени, в какой это необходимо для понимания практически важных характеристик материалов, их выбора, обработки на предприятиях электропромышленности и эксплуатации. Подробно вопросы технологии производства излагаются лишь для тех материалов и изделий, которые полностью изготавливаются на заводах электропромышленности (литые магниты, альсифер, магнитодиэлектрики, контакты). Книга состоит из четырех разделов: Раздел I, наиболее обширный (девять глав) — «Магнитные материалы», II (две главы) — «Проводниковые материалы», III (две главы) — «Сплавы высокого сопротивления» и IV (пять глав) — «Материалы для контактов». В связи с весьма большим развитием изучения и производства электротехнических металлов и сплавов в СССР за время, истекшее со времени выхода в свет первого издания, в настоящем издании сделаны многочисленные дополнения, в частности, обзорная вводная глава I раздела «Общие свойства ферромагнитных веществ», главы о чугунном и стальном литье, о магнитодиэлектриках, термомагнитных и магнитострикционных материалах, немагнитных стали и чугуне; приведены новые данные о текстурированной листовой стали, о сплавах для постоянных магнитов, о цинковых проводниковых сплавах, о новых мanganинах, о металлокерамических контактах и т. п. Специальные металлы и сплавы для электровакуумной и элементно-аккумуляторной промышленности в книге не рассматриваются. Книга предназначена, главным образом, для инженеров и научно-исследовательских работников предприятий и лабораторий электропромышленности и может также служить учебным пособием при изучении курса электротехнологии.

**ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ МЕТАЛЛОВ. Сборник статей под ред. С. Я. Турлыгина. (МТМ. ЦНИИМаш). 65 стр., ц. 5 руб. 50 коп. Магнитиздат.**

**ИНСТРУКЦИЯ ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ б и 10 кв в совхозах и предприятиях Министерства совхозов СССР. 36 стр., цена не указана. Министерство совхозов СССР.**

**ИОФФЕ Е. Ф. ОПЕРАТИВНАЯ РАБОТА В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ. 55 стр., ц. 2 руб. 40 коп. Госэнергоиздат.**

**КРАСОТКИН В. И. ПРОИЗВОДСТВО ГОЛЫХ ПРОВОДОВ И СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ С БУМАЖНОЙ ПРОПИТАНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ. Допущено Управлением учебными заведениями МЭП СССР в качестве учебника для электромеханических техникумов. 232 стр., ц. 8 руб. Госэнергоиздат, 1948.**

В книге описаны типы, марки и конструкции голых проводов для воздушных линий электропередачи до 220 кв и силовых кабелей с пропитанной бумажной изоляцией. Даны краткие сведения о материалах и полуфабрикатах кабельного производства. Подробно сказано технологическое оборудование кабельных цехов и технологический процесс производства силовых кабелей с пропитанной бумажной изоляцией, а также основные сведения по технологии изготовления маслонаполненных кабелей. Кроме того, в книге даны основные положения по проектированию технологической части кабельных цехов и краткие сведения о цеховом транспорте и складском хозяйстве описываемого производства. В книге отражены последние достижения отечественной кабельной техники. Помимо использования учащимися техникумов книга может быть рекомендована мастерам и среднему техническому персоналу кабельных заводов.

**КУЗНЕЦОВ Б. Г. ВЕЛИКИЙ РУССКИЙ УЧЕНЫЙ ЛОМОНОСОВ. 56 стр., ц. 75 коп. Военное изд-во.**

**ЛОМОНОСОВ В. Ю., ПОЛИВАНОВ К. М. ЭЛЕКТРОТЕХ-**

\* Звездочкой отмечены книги, по которым предполагается опубликование рецензий.

#### ◆ ◆ ◆

#### ПОПРАВКА

В статье А. Я. Быкова «Новый вид полного уравнения двойного моста и его применение» («Электричество», № 8, 1949), стр. 65, правая колонка, формулу (5) следует читать:

$$R_x = R_N \frac{R_3}{R_1} \left[ 1 + \frac{R_n}{R_N + R_x} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_3}{R_3} \right) \right].$$