

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1953



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

12

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

12
1953
ДЕКАБРЬ

ОРГАН АКАДЕМИИ НАУК СССР И МИНИСТЕРСТВА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ
И ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР

СОДЕРЖАНИЕ

Д. И. Азарьев, В. А. Веников и Н. Н. Соколов — Схемы дальних электропередач большой пропускной способности	3
Е. А. Марченко — Перенапряжения в установках продольной компенсации	10
Л. А. Солдаткина — К вопросу о схемах городской электросети низкого напряжения	14
В. Л. Иносов и Л. В. Цукерник — Расчет токов и напряжений в цепях обмоток возбуждения возбудителя при форсировке и развозбуждении	20
Н. П. Ермолин — Пуск и реверс электродвигателей постоянного тока последовательного возбуждения	26
В. В. Енько — Аналитическое выражение регулировочной характеристики синхронной неявнополюсной машины	31
Г. И. Бабат — Получение высоких напряжений при помощи резонансных трансформаторов	35
М. Г. Чиликин и А. М. Корытин — Некоторые вопросы динамики электрогидроприводов	40
К. Б. Карапеев и А. Я. Шрамков — Выпрямительные ваттметры	44
С. М. Кацнельсон — Катодный осциллограф с периодическим импульсным питанием	48
И. И. Пеккер — О влиянии вихревых токов на времена трогания и отпуска броневого электромагнита с массивным сердечником	50
В. Т. Ренне, В. М. Файницкий и Д. С. Варшавский — Воскообразование в изоляции бумажно-масляных конденсаторов	55
С. И. Куренев — Расчет цепей при периодических разрывных или импульсных напряжениях	59
ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ	
Д. Р. Вильям Гильберт. К 350-летию со дня смерти	63
С. А. Гусев — Первая русская установка трехфазного тока	65
В. Ф. Аксенов — Из воспоминаний инженера Новороссийской электростанции	68
ДИСКУССИИ	
Об учебнике по теоретической электротехнике для высшей школы — А. Ф. Метелкин, К. А. Карпова, Л. С. Лурье, Г. Р. Рахимов, З. И. Кязим-Заде. Терминология теоретической электротехники — А. И. Артемьев.	70
ЗАМЕТКИ И ПИСЬМА	
К вопросу о пересмотре научно-технической терминологии. О термине „реактивный двигатель“. По поводу рецензии на Справочник электромонтажника. По поводу статьи С. Г. Таманцева „Синхронный генератор с самовозбуждением от механического выпрямителя и автоматическим регулированием напряжения“. Ответ автора статьи	74
ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ	
Развитие теории электромагнитного поля в трудах русских физиков до опытов Герца. Плавуяя электростанция. Применение опор из центрифугированного железобетона для электропередач. Современные тенденции в конструировании трансформаторов для очень высоких напряжений	78
ХРОНИКА	
Научно-техническое совещание по сельской электрификации в Тбилиси	81
Электрическая тяга на однофазном токе промышленной частоты. [Е. О. Патон], [В. И. Петров]	81
БИБЛИОГРАФИЯ	
Ф. Э. Ильгекит, Д. Н. Шапиро, Л. А. Фоменко, М. А. Карпинский, А. А. Ферсман и В. П. Певницкий — Книга С. А. Лютова „Индустримальные помехи радиоприему и борьба с ними“	85
С. А. Лютов — От автора книги	87
А. П. Щетинин — К вопросу о создании инженерного пособия по борьбе с радиопомехами	89
Указатель материалов, помещенных в журнале „Электричество“ в 1953 г.	90



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Доктор техн. наук, проф. **Г. Н. Петров** (редактор), академик **А. И. Берг**,
доктор техн. наук **Г. В. Буткевич**, доктор техн. наук, проф **А. А. Глазунов**,
академик **М. П. Костенин**, доктор 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 телеграмм: Москва Электричество.
Адрес для корреспонденции: Москва, Главный почтамт,
почтовый ящик № 648

Схемы дальних электропередач большой пропускной способности

Кандидат техн. наук, доц. Д. И. АЗАРЬЕВ,
доктор техн. наук, доц. В. А. ВЕНИКОВ и инж. Н. Н. СОКОЛОВ
Москва

Осуществляемое в нашей стране строительство крупнейших гидроэлектростанций выдвинуло задачу передачи значительных количеств электроэнергии на очень большие расстояния. Уже в текущем пятилетии, как это предусмотрено директивами XIX съезда Коммунистической партии по пятому пятилетнему плану, должна войти в действие линия электропередачи Куйбышевская гэс — Москва — протяженностью свыше 900 км и напряжением 400 кв. Как известно, в силу целого ряда особенностей электропередачи на такие большие расстояния получаются пока довольно сложными и дорогими. В связи с этим актуальной является задача их упрощения и удешевления. В настоящей работе рассматривается вопрос о схемах дальних электропередач. Предлагаются такие схемы, которые, как можно полагать, значительно повысят пропускную способность и надежность электропередачи, одновременно упростив ее сооружение.

Одним из средств, повышающих пропускную способность дальних электропередач, является установка в их промежуточных точках синхронных компенсаторов. Эти компенсаторы поддерживают на линии заданное напряжение при изменении режима электропередачи и этим повышают устойчивость последней. Однако предложенная в свое время схема с промежуточными синхронными компенсаторами (Л. 1) требовала для существенного повышения статической устойчивости электропередачи такой мощности компенсаторов, которая в несколько раз превышала передаваемую мощность. Это делало схему экономически нецелесообразной.

Эффективность промежуточных синхронных компенсаторов можно значительно повысить, если установить на них автоматические регуляторы возбуждения без зоны нечувствительности, действующие пропорционально отклонению напряжения, угла вылета или тока¹. В этом случае мощность синхронных компенсаторов может быть снижена во столько раз, во сколько синхронное сопротивление компенсатора x_d больше его переходного сопротивления x_d' , т. е. примерно в 5—7 раз. Для существенного повышения статической устойчивости будет достаточна мощность

Дается описание схемы дальней электропередачи с промежуточными синхронными компенсаторами. Показываются достоинства этой схемы, выявленные в результате проведенных авторами предварительных исследований. Ставится вопрос о необходимости широкой и подробной разработки схемы. Печатается в порядке обсуждения.

синхронных компенсаторов, равная 50—70% передаваемой. Таким образом, применение автоматических регуляторов возбуждения без зоны нечувствительности делает схему с промежуточными синхронными компенсаторами более оправданной, способной конкурировать с другими средствами повышения устойчивости, например, с продольной компенсацией индуктивного сопротивления линии с помощью статических конденсаторов.

Можно достичь еще большей эффективности синхронных компенсаторов, если применить автоматические регуляторы возбуждения, реагирующие на первую и вторую производные изменения тока или напряжения, или угла вылета (регуляторы сильного действия). Наиболее существенное значение это средство имеет для повышения статической устойчивости. В отношении динамической устойчивости оно не может дать сколько-нибудь значительного эффекта, так как динамическая устойчивость зависит от параметров возбуждения (скорости и «потолка»), параметров самого компенсатора (главным образом от переходного реактивного сопротивления x_d'), постоянных времени и постоянной инерции.

Эффективность синхронного компенсатора, связанная в конечном счете с его способностью поддерживать напряжение на линии в переходных режимах, может быть повышена путем компенсации его реактивного сопротивления. С этой целью в цепь синхронного компенсатора, последовательно, включаются статические конденсаторы.² При такой схеме резко возрастает регулирующий эффект синхронного компенсатора и улучшается статическая и динамическая устойчи-

¹ Следует отметить, что еще в 1949 г. П. С. Ждановым высказывались мысли о возможности улучшения регулирующего эффекта синхронных компенсаторов с помощью включения емкости. Конкретные предложения относительно применения компенсированных синхронных компенсаторов для улучшения характеристик дальних электропередач были сделаны В. А. Вениковым и Н. Н. Соколовым (заявки № 418323—III от 17 мая 1950 г. и № 418930—III от 29 мая 1950 г.).

Исследования и обоснования наиболее рациональных схем дальних электропередач, использующих компенсированные синхронные компенсаторы, были проведены по инициативе и под руководством Д. И. Азарева, а экспериментальные исследования — под руководством В. А. Веникова.

¹ Авторское свидетельство на имя С. А. Лебедева и Л. В. Цукерника № 88937 от 19 июля 1949 г.

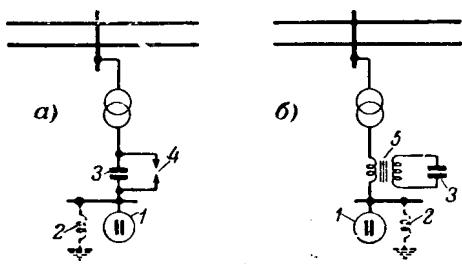


Рис. 1. Принципиальные схемы включения промежуточного синхронного компенсатора со статическими конденсаторами. а — конденсатор включен параллельно с разрядником; б — конденсатор включен через насыщающийся трансформатор; 1 — синхронный компенсатор; 2 — дроссель ($Q_{dp} = 0 \dots 0,5$); 3 — конденсатор; 4 — разрядники; 5 — насыщающийся трансформатор.

вость электропередачи. Степень компенсации реактивного сопротивления может быть различной.

При большой компенсации короткие замыкания во внешней сети могут вызывать протекание опасных для установки токов. Поэтому должны быть предусмотрены устройства, ограничивающие токи короткого замыкания. К таким устройствам могут быть отнесены разрядники, включаемые параллельно конденсаторам, а также насыщающиеся трансформаторы, через которые конденсаторы включаются в цепь (рис. 1).

Включение последовательных конденсаторов через насыщающиеся трансформаторы [Л. 2] здесь может оказаться весьма целесообразным. Выбором соответствующего вторичного напряжения можно наилучшим образом подобрать параметры батареи статических конденсаторов по току и напряжению. При кратности перенапряжений порядка 4...5 можно достаточно надежно защищить конденсаторы. В то же время в нормальных условиях и при качаниях генераторов емкостный эффект конденсаторов проявляться будет полностью, так как по предварительным данным токи при качаниях не превышают трехкратной величины. Поскольку в нормальном режиме компенсатор отдает очень небольшую мощность, потери в последовательных трансформаторах будут ничтожны. Стоимость трансформаторов, имеющих низкое напряжение, почти не удорожает и не усложняет установки.

Для выявления пропускной способности дальних электропередач с применением промежуточных синхронных компенсаторов были произведены исследования устойчивости этих электропередач, а также сопоставление последней с устойчи-

востью электропередач с продольной компенсацией. Степень компенсации реактивного сопротивления компенсаторов принималась различной.

На рис. 2 дана схема исследуемой электропередачи и параметры отдельных ее элементов. Линия делилась на отдельные участки переключательными пунктами, число пунктов изменялось от двух до трех. В качестве исходного принимался режим, при котором напряжения на концах линии равны между собой и равны единице (в относительных единицах), передаваемая мощность также равна единице. За единицу мощности принималась удвоенная натуральная мощность одной цепи линии электропередачи. Определялась статическая и динамическая устойчивость.

Определение статической устойчивости производилось с учетом действия регуляторов возбуждения. Для этого находилась максимальная мощность удаленной станции при постоянных продольных переходных э. д. с. всех ее генераторов, равных значениям этих э. д. с. в исходном расчетном режиме. Запас статической устойчивости вычислялся по следующей формуле:

$$k_{\text{stan}} = \frac{P_{\text{max}} - P_n}{P_n} \cdot 100\%.$$

Динамическая устойчивость электропередачи определялась при двухфазных замыканиях на землю. Действие регуляторов возбуждения учитывалось путем введения полной форсировки через 0,05 сек после начала короткого замыкания. Скорость и «потолок» возбуждения при этом соответствовали параметрам возбудителей.

Устойчивость оценивалась по первому циклу качаний генераторов, так как считалось, что при соответствующем типе регуляторов возбуждения последующие качания не будут опасны. Изменение нагрузки в переходных режимах учитывалось соответственно по статическим и динамическим характеристикам.

На рис. 3 представлена зависимость запаса статической устойчивости от мощности некомпенсированных синхронных компенсаторов, установленных на среднем переключательном пункте линии электропередачи. При изменении мощности синхронного компенсатора от 0 до 0,5 запас статической устойчивости увеличивается с 4,5 до 11%.

Влияние компенсации реактивного сопротивления компенсатора на статическую устойчивость электропередачи характеризуется данными рис. 4.

При мощности компенсатора, равной 0,25, наиболее эффективной является примерно полная компенсация ($x_c = x'_d + x_T$), при которой в точке, где включен поддерживавший напряжение синхронный компенсатор, линия как бы делится на две части. В результате предельная мощность всей электропередачи опреде-

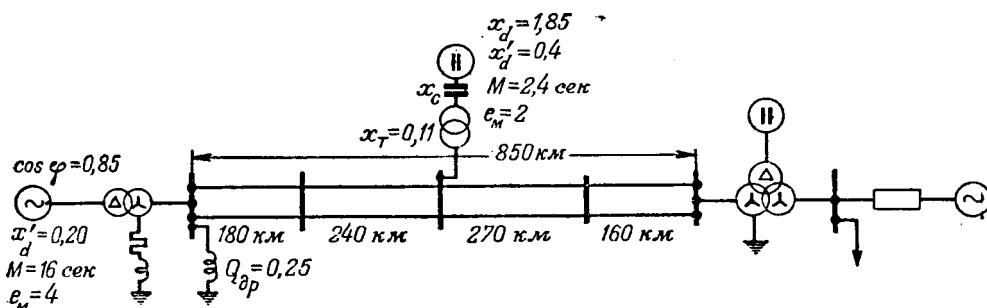


Рис. 2. Схема подвергавшейся исследованию электропередачи с применением промежуточных синхронных компенсаторов.

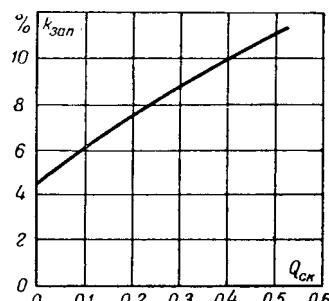


Рис. 3. Зависимость запаса статической устойчивости от мощности промежуточного синхронного компенсатора (без компенсации его реактивного сопротивления).

ляется предельной мощностью участка, имеющего наибольшее сопротивление. Эту предельную мощность участка можно приблизенно определить по следующей формуле:

$$P_{\text{пред}} = \frac{EU}{x_{\text{рез}}},$$

где E — переходная э. д. с. генераторов удаленной станции;

U — напряжение на линии в точке присоединения промежуточного синхронного компенсатора;

$x_{\text{рез}}$ — суммарное реактивное сопротивление электропередачи между точками приложения E и U .

При установке синхронных компенсаторов в нескольких точках электропередачи предельная мощность $P_{\text{пред}}$ может быть повышена, так как в этом случае сопротивление между точками, в которых напряжение поддерживается неизменным, уменьшается. Однако, как будет показано ниже, в предельных по устойчивости режимах будет иметь место перегрузка компенсаторов, с учетом величины и длительности которой и должна выбираться их мощность.

Кроме того, мощность синхронных компенсаторов должна выбираться из условия поддержания неизменным напряжения на линии в режимах, когда отдельные участки ее отключены. При этом синхронные компенсаторы не должны длительно перегружаться по току.

В исходном нормальном режиме при передаче мощности, равной единице, компенсаторы работают практически на холостом ходу. При подведении системы к предельному по устойчивости режиму допускается перегрузка их по току.

В табл. 1 приведены результаты расчетов статической устойчивости электропередачи с тремя переключательными пунктами и с промежуточным синхронным компенсатором, имеющим мощность порядка 0,25 передаваемой. Степень компенсации реактивного сопротивления компенсатора принималась равной 100, 90 и 0 %.

Как видно из табл. 1, при полной компенсации запас статической устойчивости составлял в нормальном режиме 49 %, при отключенных участках линии 14..25 %. При снижении степени компенсации до 90 % запасы статической устойчивости уменьшаются до 27 % в нормальном ре-

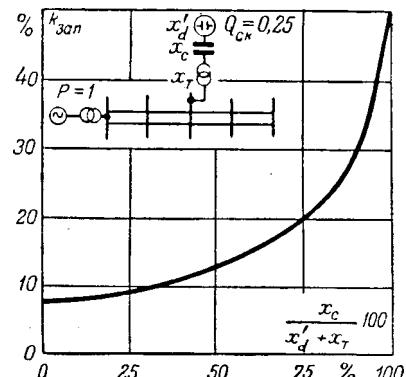


Рис. 4. Зависимость запаса статической устойчивости от степени компенсации реактивности компенсатора.

жиме и до 4..12 % в послеаварийных режимах. При отсутствии компенсации запасы устойчивости явно недостаточны.

Результаты расчетов динамической устойчивости представлены на рис. 5 в виде кривых изменения относительного угла между э. д. с. генераторов удаленной станции и станций приемной системы. Расчеты производились для случая двухфазного замыкания на землю в конце второго участка длительностью 0,12 сек. Этот случай является наиболее тяжелым, так как приводит к отключению более длинного участка линии.

В качестве мероприятия, которое противополагается емкостной компенсации реактивного сопротивления компенсатора, рассматривается отключение части генерирующей мощности на передающей станции. Отключение генераторов производилось одновременно с отключением короткого замыкания, т. е. через 0,12 сек после его начала. При полной емкостной компенсации реактивных сопротивлений x_d' и x_t система остается в синхронизме при передаче мощности, равной 1. Приблизительно такие же результаты в отношении устойчивости дают отключение генераторов мощностью, равной 0,2. При отключении генераторов мощностью, равной 0,1, устойчивость нарушается. При компенсации реактивных сопротивлений x_d' и x_t на 90 % устойчивость сохраняется при отключении генераторов мощностью около 0,1. Таким образом, емкостная компенсация реактивных сопротивлений x_d' и x_t позволяет увеличить передаваемую мощность по условиям динамической устойчивости примерно на 20 %.

Аналогичные или несколько лучшие результаты в отношении статической устойчивости по-

Таблица 1

Режим	Запас статической устойчивости при степени компенсации сопротивления $x_d' + x_t$, %		
	100	90	0
Нормальный	49	27	8
Отключена одна цепь 1 участка	23	12	—
Отключена одна цепь 2 участка	14	4	1
Отключена одна цепь 3 участка	19,5	9	—
Отключена одна цепь 4 участка	25	11,6	—

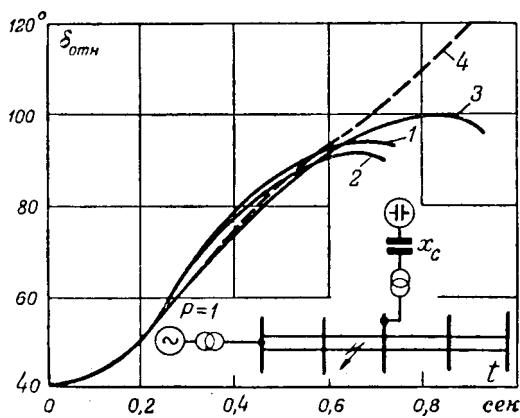


Рис. 5. Изменение относительного угла между э. д. с. генераторов удаленной станции и генераторов приемной системы при двухфазном замыкании на землю в схеме с одним компенсатором.

1 — $x_C = x'_d + x_T$, без отключения генераторов на передающей станции; 2 — $x_C = 0.9(x'_d + x_T)$, с отключением генераторов мощностью 0,1; 3 — $x_C = 0$, с отключением генераторов мощностью 0,2; 4 — $x_C = 0$, с отключением генераторов мощностью 0,1.

лучаются, если разделить рассматриваемую электропередачу на три примерно равные части и установить на двух промежуточных подстанциях синхронные компенсаторы. При такой схеме линия имеет две точки, в которых напряжение поддерживается неизменным, что естественно повышает устойчивость электропередачи. Однако для реализации этого эффекта требования, предъявляемые к синхронным компенсаторам в отношении их перегрузочной способности, должны быть выше (см. далее).

В табл. 2 приведены результаты расчетов статической устойчивости электропередачи с двумя промежуточными подстанциями в нормальных и послеаварийных режимах. Мощности синхронных компенсаторов при расчетах принимались равными 0,13 передаваемой мощности.

При полной компенсации реактивных сопротивлений обоих компенсаторов запас статической устойчивости в нормальном режиме составляет около 70%, а при отключении на каждом уча-

стке линии одной цепи — 19...33%. При полной компенсации реактивного сопротивления только второго синхронного компенсатора запас устойчивости снижается до 30 и 8% соответственно в нормальном и послеаварийном режимах. При отсутствии статических компенсаторов запас устойчивости резко падает.

Результаты расчетов динамической устойчивости электропередачи с двумя промежуточными синхронными компенсаторами представлены на рис. 6; они показывают эффективность компенсации реактивного сопротивления компенсатора.

Интересно выяснить влияние расстановки синхронных компенсаторов на статическую устойчивость электропередачи с тремя переключательными пунктами. С этой целью были рассмотрены три случая расстановки синхронных компенсаторов: на одном, двух и трех промежуточных пунктах.

При передаче по линии мощности, равной 1, синхронные компенсаторы практически не несут никакой нагрузки. По мере увеличения передаваемой мощности и приближения системы к пределу устойчивости, синхронные компенсаторы, стремясь поддержать напряжение, отдают все большую и большую мощность. Получается большая или меньшая степень перегрузки синхронных компенсаторов, зависящая главным образом от предела передаваемой мощности, т. е. от запаса устойчивости. При размещении синхронных компенсаторов на всех трех промежуточных пунктах пропускная способность передачи получается наибольшая. Но для реализации этой наибольшей пропускной способности при одинаковой степени перегрузки компенсаторов, например, пятикрат-

Таблица 2

Режим	Степень компенсации сопротивлений $x'_d + x_T$, %		Запас статической устойчивости, %
	на первом синхронном компенсаторе	на втором синхронном компенсаторе	
Нормальный	100	100	72
Отключена одна цепь 1 участка	100	100	26
Отключена одна цепь 2 участка	100	100	33
Отключена одна цепь 3 участка	100	100	19
Нормальный	0	100	30
Отключена одна цепь 1 участка	0	100	8
Нормальный	0	0	9
Отключена одна цепь 1 участка	0	0	2

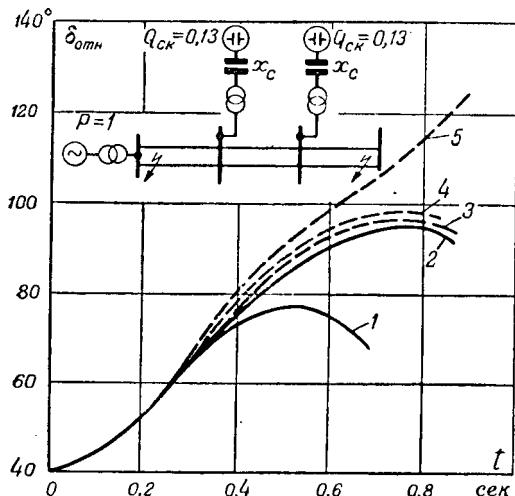


Рис. 6. Изменение относительного угла между э. д. с. генераторов удаленной станции и генераторов приемной системы при двухфазном замыкании на землю в схеме с двумя компенсаторами.

1 — $x_C = x'_d + x_T$, без отключения генераторов на передающей станции; 2 — $x_C = 0$, с отключением генераторов мощностью 0,1; 3 — $x_C = x'_d + x_T$, без отключением генераторов мощностью 0,1; 4 — $x_C = 0$, с отключением генераторов мощностью 0,2; 5 — $x_C = 0$, с отключением генераторов мощностью 0,1. В первых двух случаях короткое замыкание в начале электропередачи, в последних трех — в конце.

ной, потребуется большая мощность синхронных компенсаторов. При размещении синхронных компенсаторов на одном (центральном) пункте, запас устойчивости получится меньшим и соответственно потребуется меньшая мощность синхронных компенсаторов.

Необходимая мощность синхронных компенсаторов была определена для нескольких вариантов их размещения (рис. 7, табл. 3) при условии получения одинаковой пропускной способности и одинакового запаса статической устойчивости. Перегрузка синхронных компенсаторов при этом принималась для всех вариантов одинаковой и равной пятикратному номинальному току. Результаты расчетов приведены в табл. 3. Они показывают, что при одинаковых запасах устойчивости, мощности синхронных компенсаторов, размещаемых в различных пунктах, практически получаются одинаковыми. Таким образом, в рассматриваемых условиях различное размещение синхронных компенсаторов вдоль линии с точки зрения устойчивости практически равноценно. При других условиях результаты могут получиться несколько иными.

Таблица 3

Синхронные компенсаторы устанавливаются на переключательных пунктах (рис. 7)	Режим	Запас устойчивости, %	Мощность синхронных компенсаторов			
			Q_1	Q_2	Q_3	δQ
II	Нормальный	49	—	0,25	—	0,25
I и II	Нормальный	49	0,09	0,13	—	0,22
II и III	Нормальный	49	—	0,19	0,6	0,25
I, II и III	Нормальный	49	0,09	0,05	0,08	0,22
I и II (при двух переключательных пунктах)	Нормальный	49	0,16	0,09	—	0,25

Практически мощность синхронных компенсаторов и выбор числа промежуточных пунктов для их размещения определяется тем запасом устойчивости, который необходимо обеспечить при передаче заданной мощности, т. е. определяется требуемой пропускной способностью электропередачи.

Эта задача относится к области конкретного проектирования. Желательно, чтобы пункты, в которых намечено установить промежуточные синхронные компенсаторы, делили электропередачу таким образом, чтобы реактивные сопротивления между точкой приложения э. д. с. генераторов в схеме замещения электропередачи и точками присоединения синхронных компенсаторов были одинаковыми. При этих условиях мощность синхронных компенсаторов, необходимая для обеспечения требуемого запаса устойчивости, получается наименьшей.

При большой степени компенсации реактивного сопротивления компенсатора возникает опасность раскачивания. Возможность возникновения этого явления приближенно может быть

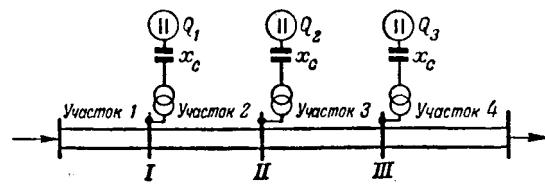


Рис. 7. Схема электропередачи с тремя переключательными пунктами (I, II и III).

установлена путем определения знака и величины относительного ускорения системы, состоящей из компенсированного синхронного компенсатора и генератора, эквивалентного генераторам передающей станции и приемной системы. Относительное ускорение системы

$$a_{12} = \frac{1}{M_1} \frac{dP_1}{d\delta_{12}} - \frac{1}{M_2} \frac{dP_2}{d\delta_{12}}$$

(величины с индексом 1 относятся к компенсатору, а с индексом 2 — к генератору).

Результаты расчетов, представленные на рис. 8, показывают, что опасность раскачивания появляется при величине компенсирующего емкостного сопротивления, превышающей реактивное сопротивление $x_d + x_T$. Расчет произведен в предположении, что регуляторы возбуждения поддерживают неизменной э. д. с. за переходным сопротивлением ($E_d' = \text{пост}$). При применении регуляторов возбуждения сильного действия область возникновения раскачивания может быть сдвинута в сторону еще большей степени компенсации. В нормальных режимах не возникает опасности самовозбуждения компенсатора, поскольку при любых компенсациях внешнее сопротивление компенсатора остается индуктивным.

Самовозбуждение в режимах коротких замыканий вблизи компенсатора легко устраниется подбором характеристик трансформатора при схеме рис. 1,б или включением последовательно с разрядником активных сопротивлений при схеме рис. 1,а.

Сопоставим устойчивость двух электропередач: с компенсированными синхронными компенсаторами (рис. 9,а) и с продольной емкостной

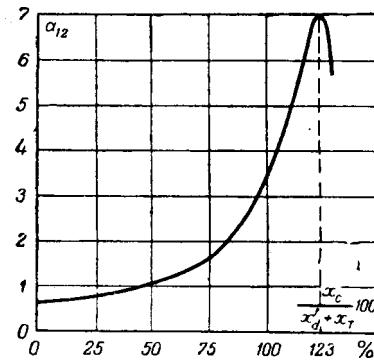


Рис. 8. Зависимость относительного ускорения системы от степени компенсации.

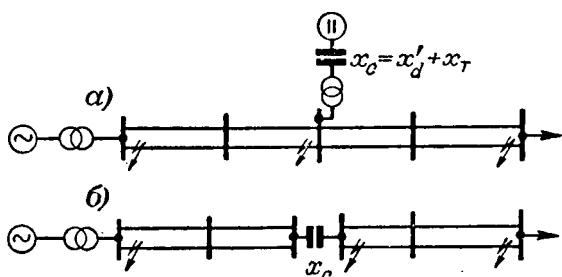


Рис. 9. Схемы сопоставляемых электропередач. а—с промежуточным синхронным компенсатором; б—с продольной и емкостной компенсацией.

компенсацией (рис. 9, б). Принято, что во второй электропередаче компенсируется около 40% сопротивления линии, статические конденсаторы размещены на среднем переключательном пункте. В послеаварийном режиме степень компенсации сопротивления линии увеличивается в 1,33 раза за счет отключения части параллельных ветвей, которое осуществляется через 0,2 сек после начала короткого замыкания. Результаты сопоставления представлены на рис. 10 и в табл. 4.

Таблица 4

Режим	Запас статической устойчивости, %	
	Схема с промежуточным синхронным компенсатором	Схема с продольной компенсацией
Нормальный	49	17,5
Отключена одна цепь 1 участка	23	12
Отключена одна цепь 2 участка	14	10
Отключена одна цепь 3 участка	19,5	10
Отключена одна цепь 4 участка	25	8

Из рис. 10 видно, что электропередачи с промежуточными синхронными компенсаторами и с продольной компенсацией по динамической устойчивости приблизительно равнозначны. По статической же устойчивости, как это видно из табл. 4, электропередача с промежуточными синхронными компенсаторами имеет значительно большие запасы, чем с продольной компенсацией.

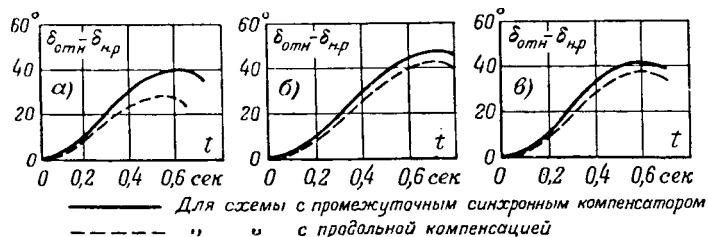


Рис. 10. Взвинченное двухфазным замыканием на землю изменение угла между э. д. с. генераторов передающей станции и приемной системы. Начальный относительный угол для схемы с промежуточными синхронными компенсаторами 49° , для схемы с продольной компенсацией 19° . а—замыкание в начале линии; б—замыкание в середине линии; в—замыкание в конце линии.

Сопоставление также показало, что потери энергии в той и другой электропередаче примерно одинаковы. Электропередачи с промежуточными синхронными компенсаторами требуют меньших капитальных затрат, чем электропередачи с продольной компенсацией.

Приведенные результаты получены в предположении, что в промежуточных точках электропередачи устанавливались синхронные компенсаторы с обычными параметрами: $x_d' = 0,4$; $M = 2,4$ сек, «потолок» возбуждения — 2, $T_{d0} = 11$ сек. Однако более целесообразно применять синхронные компенсаторы с уменьшенными x_d' и T_{d0} , увеличенной постоянной инерции и повышенным «потолком» возбуждения. При надлежащем выборе параметров синхронных компенсаторов можно получить электропередачу с более благоприятными характеристиками особенно в отношении динамической устойчивости.

Что же касается статической устойчивости, то в этом отношении большие перспективы сулит применение регуляторов возбуждения сильного действия.

Применение синхронных компенсаторов со специальными параметрами и регуляторов сильного действия может позволить заметно уменьшить степень компенсации реактивного сопротивления синхронных компенсаторов, что желательно по ряду соображений.

Сильная компенсация реактивного сопротивления синхронных компенсаторов приводит к ряду нежелательных особенностей в их работе и в работе всей установки в целом. В частности, при изменении режима работы синхронного компенсатора от максимального потребления им реактивной мощности до выдачи максимальной мощности имеют место большие отклонения напряжения на его зажимах.

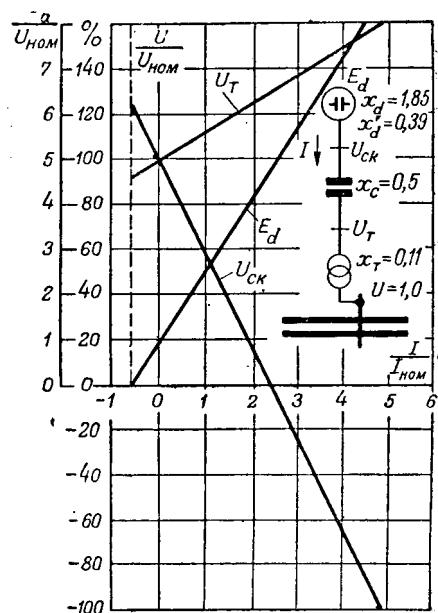


Рис. 11. Зависимость напряжения и э. д. с. синхронного компенсатора от тока.

На рис. 11 приведены кривые, характеризующие изменение напряжения на зажимах компенсатора и трансформатора, а также изменения э. д. с. (тока возбуждения) компенсатора в зависимости от его нагрузки. Как видно из кривых, напряжение на компенсаторе меняется от 125% в режиме максимального потребления до 60% в режиме выдачи номинальной мощности. При увеличении же нагрузки компенсатора сверх номинальной оно снижается до нуля, а затем меняет свою фазу. Напряжение на вторичной стороне трансформатора меняется значительно меньше, оно колеблется лишь в пределах от 92 до 111% при изменении нагрузки компенсатора от 0,6 до 1. Нагрузка компенсатора сверх номинальной будет иметь место при качаниях и в режимах, угрожающих устойчивости системы. Таким образом, приведенные зависимости показывают на желательность снижения реактивностей синхронного компенсатора. Это позволит удовлетвориться меньшим значением x_C , что в свою очередь снизит отклонения напряжения на компенсаторе.

Отклонения напряжения могут быть уменьшены также путем включения всех статических конденсаторов (или части их) в цепь синхронного компенсатора со стороны его нулевых выводов.

Описанные в настоящей работе схемы электропередачи с компенсированным синхронным компенсатором были экспериментально проверены на динамической модели.³ При проведении опытов, в которых промежуточный синхронный компенсатор работал без регулятора возбуждения, оказалось возможным довести компенсирующее сопротивление x_C до величины, близкой к $x_q + x_T$. Работа электропередачи при всех этих значениях x_C оставалась вполне устойчивой. При достаточно больших значениях x_C , равных приблизительно $0,75(x_q + x_T)$, начинались устойчивые качания, не переходящие самопроизвольно в нарастающие и не вызывающие неустойчивости. Работа синхронного компенсатора при этих качаниях характеризуется осциллограммами, представленными на рис. 12.

В результате сопоставления осуществленных на модели режимов электропередач с компенсаторами, имеющими некомпенсированное и компенсированное реактивное сопротивление, было установлено, что последние обеспечивают заметное увеличение предела передаваемой мощности, доходящего до 1,2...1,25 мощности, передаваемой по линии с некомпенсированными компенсаторами.

Заслуживает исследования выявленная при проведении экспериментов возможность улучшения устойчивости быстрым увеличением степени компенсации. При отключении выключателей v_1 и v_2 (рис. 13) имеет место эффект, напоминающий мгновенную форсировку возбуждения. На рис. 13 показано происходящее при этом изменение напряжения на шинах синхронного компенсатора.

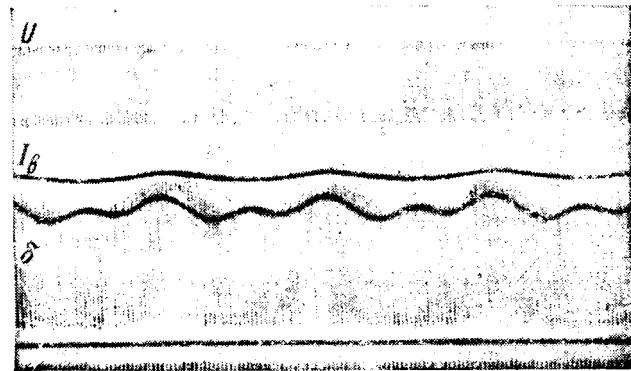


Рис. 12. Осциллограммы работы синхронного компенсатора без регулятора напряжения при $x_C \approx 0,75 (x_q + x_T)$.

Экспериментальные исследования описанной в настоящей работе схемы для случая, когда промежуточный синхронный компенсатор имеет регулятор возбуждения, показали явную зависимость допустимой степени компенсации от свойств регулятора и его настройки. Есть основания полагать, что наиболее целесообразным типом регулятора для данного случая будет регулятор, реагирующий на отклонение угла и его производные. Однако не исключена возможность регулирования по напряжению в точке присоединения компенсатора и по току линии и его производным.

Естественно, в настоящей статье не могли найти отражения все вопросы, которые могут возникнуть в связи с осуществлением дальних электропередач с применением компенсированных промежуточных синхронных компенсаторов. В ней, в частности, не нашли отражения вопросы о резонансных перенапряжениях, о защитных устройствах и типе разрядников, о релейной защите и многие другие, требующие своего разрешения вопросы. Однако настоящая работа с достаточной убедительностью показывает, что схемы дальних электропередач с промежуточными синхронными компенсаторами должны найти свое применение и заслуживают самой широкой разработки, так как они позволяют:

1. Осуществить электропередачи большой пропускной способности на расстояния порядка 1 000 км при мощности синхронных компенсаторов, не превышающей 0,25 передаваемой.

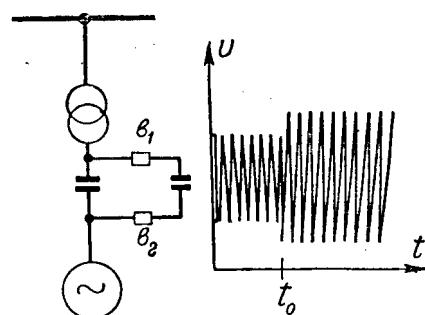


Рис. 13. Изменение напряжения на шинах синхронного компенсатора при отключении выключателей v_1 и v_2 .

³ Эксперименты проведены Д. А. Федоровым.

2. Отказаться от установки вдоль линии дросселей, поскольку в электропередаче нет добавочных источников реактивной мощности в виде статических конденсаторов, как это имеет место в схемах с продольной компенсацией.

3. Осуществить питание электроэнергией районов, прилегающих к промежуточным подстанциям.

4. Применить такое надежное и освоенное оборудование, каким являются синхронные компенсаторы.

5. Использовать более эффективно новые типы регуляторов возбуждения и этим еще больше

повысить пропускную способность и надежность электропередачи.

6. Сократить капитальные затраты на устройство электропередачи по сравнению со схемами с продольной компенсацией.

Литература

1. F. G. Вайнт. *Voltage Regulation and Insulation for Large Power, Long Distance Transmission Systems*. Trans, AIEE, Vol. 40, 1921.

2. В. А. Веников. Авторское свидетельство № 91595 от 29 мая 1950 г. на изобретение „Схема включения статических конденсаторов“.

{2.9. 1953}



Перенапряжения в установках продольной компенсации

Инж. Е. А. МАРЧЕНКО

Научно-исследовательский институт постоянного тока

Одним из мероприятий, позволяющих увеличить пропускную способность дальней электропередачи, является продольная емкостная компенсация, осуществляемая посредством последовательного включения в линию батарей конденсаторов.

Батареи конденсаторов могут быть сосредоточены в одном месте, размещены вдоль линии между переключательными пунктами или установлены на самих переключательных пунктах. Они состоятся из большого числа конденсаторов, соединенных в последовательно-параллельные группы, а сами конденсаторы — из некоторого числа параллельно соединенных секций, защищенных плавкими предохранителями. Для осмотра и ремонта, а также автоматического увеличения степени компенсации в послеаварийных режимах предусматривается возможность включения и отключения отдельных частей батареи. При аварийных, а в некоторых случаях и при нормальных коммутационных переключениях конденсаторы могут подвергаться перенапряже-

ниям, рассмотрению которых и посвящена настоящая работа.

Как в нормальном, так и в послеаварийном режимах включение установки продольной компенсации в линию происходит в результате отключения шунтирующего выключателя или гашения дуги в разряднике, служащем для защиты конденсаторов от перенапряжений при коротких замыканиях на линии.

Если линия имеет небольшую длину и одну установку продольной компенсации, включаемую одним аппаратом, задача сводится к нахождению напряжения на емкости C при включении в цепь, состоящую из активного сопротивления, индуктивности и емкости (R, L, C), синусоидальной э. д. с. при нулевых начальных условиях. Найденное в результате решения этой задачи напряжение содержит, как известно, свободную составляющую, которая при действительных параметрах электропередачи сравнительно быстро затухает. Практически переходный процесс длится несколько периодов, в течение которых напряжение на включаемой батарее может почти вдвое превысить свое установившееся значение. Обычно эти перенапряжения не представляют опасности для конденсаторов и не приводят к зажиганию разрядника.

Более протяженные линии могут иметь несколько установок продольной компенсации или одну установку большой мощности, разделенную на несколько последовательных частей, каждая из которых может включаться независимо от других. Включение установок или частей установки про-

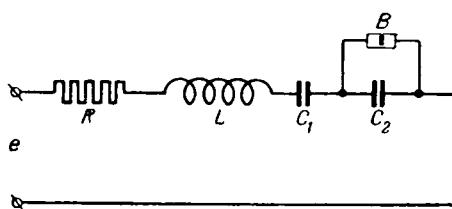


Рис. 1. Принципиальная схема линии электропередачи с двумя установками продольной компенсации C_1 и C_2 .

изводится поочередно, т. е. последующая включается в линию уже при включенной предыдущей. Переходный процесс в этом случае существенно отличается от только что рассмотренного.

На рис. 1 представлена принципиальная схема электропередачи с двумя установками продольной компенсации C_1 и C_2 . Под L следует понимать индуктивность линии и концевых устройств, а под $e = E_m \sin \omega t$ — э. д. с., равную разности между э. д. с. генератора и напряжением системы. Если предположить, что контакты выключателя размыкаются в момент прохождения тока в цепи через нуль, то напряжения на емкостях C_1 и C_2 соответственно можно выразить следующим образом

$$u_1 = - \frac{E_m}{\omega C \sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} (\cos \omega t - e^{-\alpha t} \cos \beta t) - \frac{U_{10} \beta_0}{2\beta} e^{-\alpha t} \sin(\beta t + \theta) - \frac{U_{10}}{2}, \quad (1)$$

$$u_2 = - \frac{E_m}{\omega C \sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} (\cos \omega t - e^{-\alpha t} \cos \beta t) - \frac{U_{10} \beta_0}{2\beta} e^{-\alpha t} \sin(\beta t + \theta) + \frac{U_{10}}{2}, \quad (2)$$

где

$$\alpha = \frac{R}{2L}; \quad \beta_0^2 = \frac{1}{LC}; \quad \beta = \sqrt{\beta_0^2 - \alpha^2}; \quad \omega = 314;$$

U_{10} — напряжение на емкости C_1 в момент включения емкости C_2 . Для простоты рассуждений положено $C_1 = C_2 = 2C$.

Из выражений (1) и (2) видно, что, по окончании переходного процесса, напряжения на обеих емкостях содержат, помимо вынужденных, постоянные составляющие, одинаковые по величине и обратные по знаку. В данном случае они равны половине того напряжения, которое было на

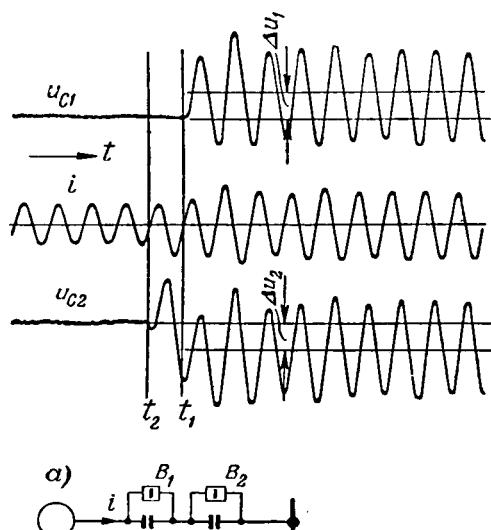


Рис. 3. Восстановление напряжения на батарее конденсаторов при включении ее в линию по частям.

а — выключатель B_2 был отключен в момент t_2 , а выключатель B_1 — в момент t_1 , $t_1 > t_2$. б — выключатель B_2 был отключен в момент t_2 , а выключатель B_1 был отключен значительно раньше, $t_2 > t_1$.

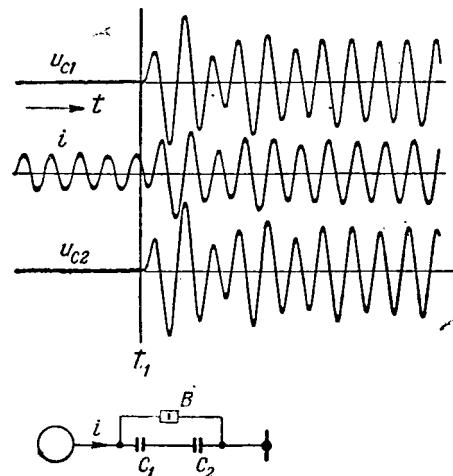
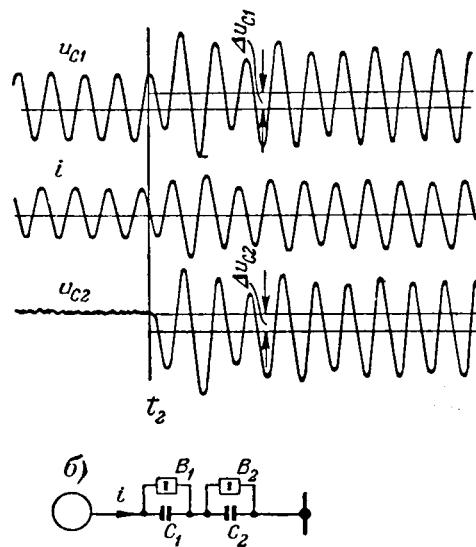


Рис. 2. Восстановление напряжения на батарее конденсаторов при включении ее в линию одним выключателем B . t_1 — момент отключения выключателя B .

емкости C_1 в момент включения емкости C_2 . Если не принять специальных мер, затухание этих составляющих будет определяться только величиной утечки самих конденсаторов, не учтено в выражениях (1) и (2), и может длиться несколько часов.

На рис. 2 приведена осциллограмма процесса восстановления напряжения на батарее при включении ее в линию всей сразу, а на рис. 3 — при поочередном включении двух ее частей. На рис. 4 показан процесс восстановления напряжения на батарее при включении $\frac{1}{4}$ ее части, выведенной ранее в ремонт или для осмотра. Осциллограммы на рис. 2 и 3 сняты на одной и той же модели в одинаковом масштабе.

Возможность появления и значение постоянных составляющих напряжения можно определить более простым путем, без составления и решения дифференциальных уравнений всей цепи.



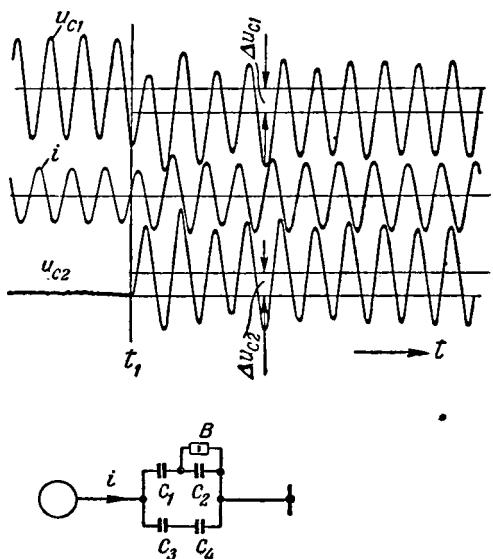


Рис. 4. Восстановление напряжения при включении $1/4$ части батареи, выведенной ранее в ремонт или для осмотра.
 t_1 — момент отключения выключателя B .

Переходный процесс при включении емкости C_2 , когда заряд на емкости C_1 не равен нулю, можно рассматривать состоящим из двух процессов: 1) процесса, связанного с включением в цепь, состоящую из R , L , C_1 , C_2 , синусоидальной э. д. с. при нулевых начальных условиях; 2) процесса, связанного с тем, что заряд q_1 на емкости C_1 не равен нулю.

Второй процесс представляет собой не что иное, как зарядку емкости C_2 через линию от емкости C_1 , в результате которой заряд q_1 распределяется между обеими емкостями в соответствии с их значениями. Напряжения на емкостях C_1 и C_2 , обусловленные их зарядами, по своей абсолютной величине равны между собой

$$\Delta U_1 = \Delta U_2 = \frac{q_1(0) - q_2(0)}{C_1 + C_2} = \frac{C_1 U_{10}}{C_1 + C_2} = \frac{U_{10}}{2}, \quad (3)$$

что и нашло свое отражение в выражениях (1) и (2).

Таким образом, условием появления постоянных составляющих в напряжениях на последовательных конденсаторах является нарушение равенства зарядов этих конденсаторов в результате коммутации. Численно постоянная составляющая напряжения равна разности зарядов последовательно включенных конденсаторов, деленной на сумму их емкостей. Определение вызванной коммутацией разности зарядов затруднений не представляет.

Мы рассмотрели случай поочередного включения только двух емкостей. При поочередном же включении большего числа емкостей, как легко себе представить, на отдельных из них возможно постепенное накопление зарядов и значительное повышение напряжения.

Ввиду того, что ударное значение перенапряжения при включении батареи возрастает с увеличением степени компенсации, возможны попыт-

ки уменьшить это перенапряжение включением батареи частями. Однако, как показывают произведенные расчеты, ударные значения перенапряжений при одновременном включении всей батареи и при включении ее по частям оказываются одного порядка. Это видно также и из сравнения осциллограмм рис. 2 и 3. Следовательно, ударное значение перенапряжения не может быть уменьшено включением батареи частями.

Внутри батареи также возможно появление постоянных составляющих напряжения на отдельных последовательно включенных конденсаторах; если отключение поврежденной секции плавким предохранителем сопровождается полным разрядом конденсатора или возникновением другого проходящего замыкания конденсатора.

Изменение степени компенсации электроподачи достигается не только путем включения или отключения последовательных конденсаторов, но также и путем включения к ним или отключения параллельных конденсаторов, как это показано на схеме рис. 5, где к одному из двух последовательных конденсаторов может быть параллельно включен третий конденсатор. Эти операции также могут сопровождаться появлением постоянных составляющих напряжения.

Для простоты рассуждений положим, что в схеме рис. 5 $C_1 = C_2 = C_3 = C$. Аналогично предыдущему получим:

а) при отключении конденсатора C_3 появляется постоянная составляющая

$$\Delta U_1 = \Delta U_2 = \frac{q_1(0) - q_2(0)}{C_1 + C_2} = \frac{1}{4} U_{10};$$

б) при обратном включении конденсатора C_3 постоянная составляющая

$$\Delta U_1 = \Delta U_{23} = \frac{q_1(0) - q_{23}(0)}{C_1 + C_2 + C_3} = 0,$$

т. е. она исчезает;

в) при включении конденсатора C_3 , заряженного до напряжения U_{30} при $U_{10} = U_{20}$ появляется постоянная составляющая

$$\Delta U_1 = \Delta U_{23} = \frac{q_1(0) - q_{23}(0)}{C_1 + C_2 + C_3} = \frac{U_{30}}{3}.$$

Отметим, что при включении или отключении параллельных конденсаторов постоянные составляющие по своей величине оказываются меньшими, чем при включениях или отключениях последовательных конденсаторов. Однако это справедливо лишь при условии, если операции производятся после отключения короткого замыкания в линии. В противном случае возможны большие значения постоянных составляющих.

При расположении батарей продольной компенсации в разных точках линии возможен случай, когда короткое замыкание в средине линии не сопровождается зажиганием разрядников на

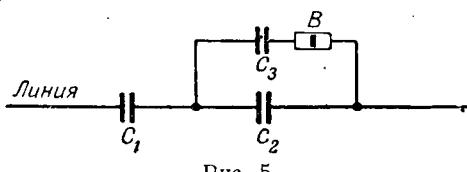


Рис. 5.

батареях, расположенных на ее концах. Напряжения на этих батареях в момент отключения короткого замыкания имеют максимальные значения и обратны по знаку (рис. 6), вследствие чего после отключения короткого замыкания появляется постоянная составляющая

$$\Delta U = \frac{q_1(0) + q_2(0)}{C_1 + C_2 + C_s}, \quad (4)$$

где $q_1(0)$ — величина заряда на емкости C_1 в момент отключения короткого замыкания [$q_1(0) = C_1 U_{10}$];

$q_2(0)$ — то же, на емкости C_2 [$q_2(0) = C_2 U_{20}$];
 C_s — емкость линии на участке между батареями;

U_{10} и U_{20} — максимальные значения напряжения на емкостях C_1 и C_2 в момент отключения короткого замыкания.

В рассматриваемом случае постоянная составляющая появляется не только в напряжении на конденсаторах, но и в напряжении участка линии между батареями относительно земли.

Напряжения U_{10} и U_{20} по своей величине близки к пробивным напряжениям разрядников, установленных на батареях. Емкость же участка линии между батареями C_s мала по сравнению с емкостью каждой из батарей. Поэтому постоянные составляющие могут иметь такое значение, при котором наложение на них вынужденной составляющей после отключения короткого замыкания приведет к пробою разрядника. Таким образом, установка будет выведена из работы как раз в тот момент, когда она нужна для обеспечения устойчивого перехода к послеаварийному режиму.

Чтобы уменьшить вероятность наложения перенапряжений при коротком замыкании на постоянную составляющую, необходимо принять меры к значительному сокращению времени стекания постоянных зарядов с отдельных частей батареи.

Стекание зарядов, возникших при нормальных включениях и отключениях отдельных частей батареи, можно ускорить, если параллельно этим частям включить активные сопротивления. С отключенной батареи заряды снимаются путем замыкания ее шунтирующим выключателем.

Однако с помощью этих средств нельзя снять заряды, возникшие внутри батареи, на отдельных

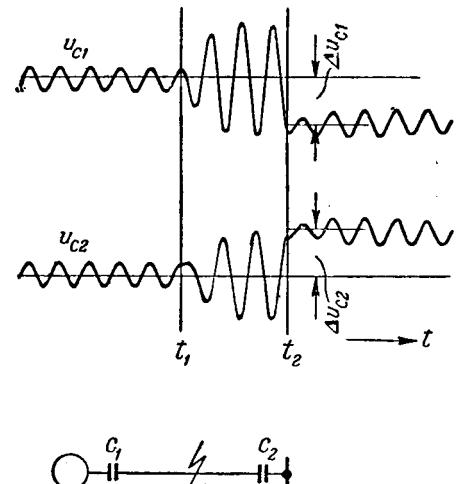


Рис. 6. Перенапряжения на батареях конденсаторов после отключения короткого замыкания в середине линии.
 t_1 — момент короткого замыкания; t_2 — момент отключения короткого замыкания.

ее конденсаторах. Эти заряды полностью снимаются только в результате установки закороток на каждом конденсаторе в отдельности. При наличии большого числа конденсаторов в батарее установка закороток является весьма трудоемкой операцией. Также трудоемкой является поочередная разрядка конденсаторов при отключенной и заземленной батареи. Кроме того, такая разрядка не освобождает полностью батарею от постоянных зарядов. Поэтому следует рекомендовать установку разрядных сопротивлений на каждый конденсатор в отдельности.

Расчеты показывают, что при постоянной времени 5 мин, мощность, теряемая в таких сопротивлениях, весьма мала, что позволяет устанавливать их даже внутри бака конденсатора.

Чтобы избежать нежелательного пробоя разрядников при отключении короткого замыкания на участке линии между батареями, постоянные заряды должны быть сняты за весьма короткий промежуток времени (порядка 0,01 сек). Для этого помимо разрядных сопротивлений необходимы дополнительные разрядные цепи, устанавливаемые параллельно батареям или их частям и включающие в себя нелинейный элемент (например, вентильный разрядник). Реакторы, включенные в середине линии, являются дополнительным путем для стекания зарядов.

[17.1.1953]

К вопросу о схемах городской электросети низкого напряжения

Кандидат техн. наук Л. А. СОЛДАТКИНА
Московский энергетический институт им. Молотова

В районах большого города, застроенных домами в 5..8 этажей, при повреждениях в сети высокого напряжения и в сетевых трансформаторах даже кратковременные перерывы в подаче электроэнергии бытовым потребителям не должны иметь места. При повреждениях же в сети низкого напряжения эти перерывы допускаются, но лишь на время, необходимое для производства переключений в этой сети, а не на время для устранения повреждений.

Это условие может быть выполнено при двухлучевой автоматизированной сети высокого напряжения или при различных замкнутых сетях низкого напряжения: поперечно-замкнутой, ограниченно-замкнутой и сложно-замкнутой, подробное описание которых дано в [Л. 1].

Технико-экономическое исследование различных схем сетей низкого напряжения в настоящей работе ведется применительно к одному типовому кварталу района. План половины такого квартала представлен на рис. 1. Указанные на плане нагрузки отдельных зданий определены из расчета, что наибольшая бытовая (освещение, нагревательные приборы, холодильники, мелкие электродвигатели) и наибольшая силовая (пассажирские подъемники, насосы и т. п.) нагрузки составляют 2,2 вт на 1 м³ здания, что соответствует, в среднем, удельной нагрузке около 20 вт на 1 м² жилой оплачиваемой площади. Общая нагрузка половины квартала 520 квт, размеры его 185 × 200 м², площадь 37 000 м². Средняя плотность нагрузки около 14 000 квт/км².

В зависимости от схемы сети в расчетную половину квартала входят здания I—VI или здания II—V и половины зданий I, VI, VII и VIII. Питание других половин зданий I, VI, VII и VIII осуществляется от трансформаторных подстанций, расположенных в соседних полукварталах.

Во всех зданиях силовая нагрузка принимается равной 30% всей нагрузки и сосредоточенной на силовом щите в центре здания. Каждый силовой щит имеет две секции шин. Бытовая нагрузка по зданию распределяется равномерно. Бытовые вводы располагаются в парадных входах в здание. На рис. 1 указаны нагрузки каждого здания в целом и отдельных силовых и бытовых вводов. Для бытовой нагрузки коэффициент мощности принят равным единице, для силовой — 0,8. Тех-

нические условия для проектирования сети даны в приложении.

Результаты, полученные для типового квартала, могут быть распространены и на другие районы города с домами в 5..8 этажей.

В настоящей работе рассматриваются четыре варианта сети низкого напряжения: варианты 1, 2 и 2,а — питание сети низкого напряжения осуществляется от двухлучевой автоматизированной сети высокого напряжения с 4 и 2 сетевыми подстанциями на квартал; варианты 3 и 3,а — поперечно-замкнутая сеть низкого напряжения и вариант 4 — сложно-замкнутая сеть низкого напряжения.

Предварительный анализ показывает, что для поперечно-замкнутой и сложно-замкнутой сетей низкого напряжения оптимальным числом сетевых подстанций на квартал является четыре, а для двухлучевой автоматизированной сети высокого напряжения четыре или две. Увеличение числа сетевых подстанций в квартале сверх указанного требует увеличения капиталовложений в сеть и годовых эксплуатационных расходов.

Двухлучевая автоматизированная сеть высокого напряжения при устройстве сетевой подстанции в каждом здании требует примерно в два раза больших капиталовложений и годовых эксплуатационных расходов, чем та же сеть при двух подстанциях на квартал. При одной подстанции на два здания она требует капитальных затрат и годовых эксплуатационных расходов на 15% больше, чем при четырех подстанциях в квартале.

Во всех вариантах выбиралось наивыгоднейшее местоположение сетевых трансформаторных подстанций. Однако анализ показал, что изменение местоположения подстанций при заданном их числе мало влияет на экономические показатели вариантов сети. Например, в варианте 2 перенос местоположения сетевой подстанции в точку А или в точку В (рис. 3) изменит капиталовложения в сеть на 1..4%, что лежит в пределах точности расчетов.

В вариантах 2, 3 и 4 здания II, III, IV и V питаются от магистральной сети, а здания I и VI (или половины зданий I, VI, VII и VIII) — от ответвлений, отходящих от магистральной сети

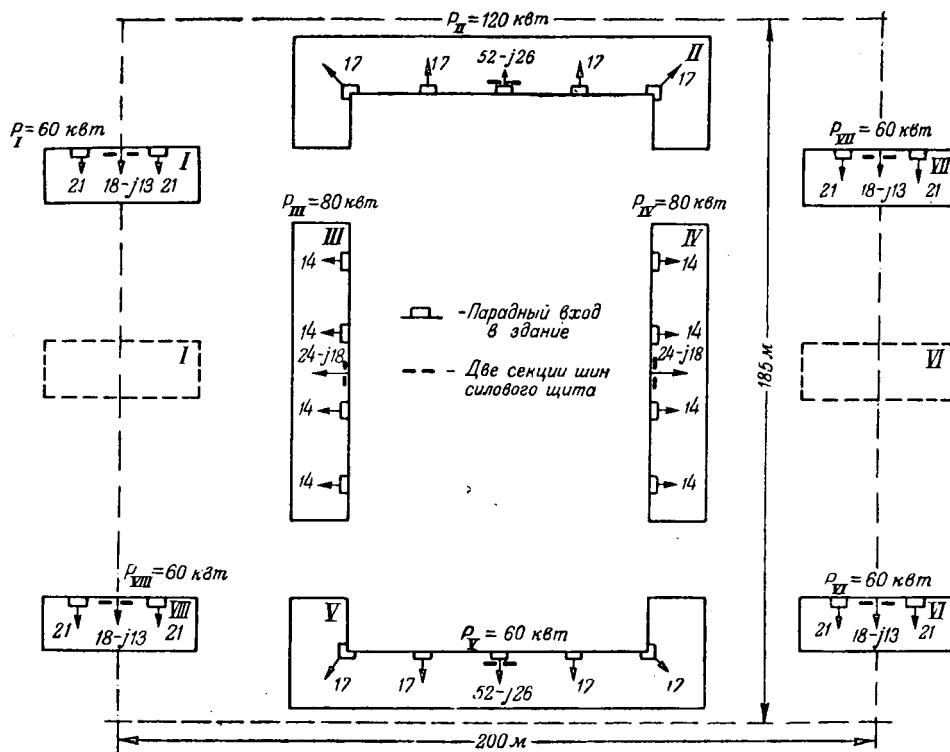


Рис. 1. План половины типизированного квартала города. Масштаб: 1 : 1 000.
Цифры у стрелок означают нагрузки в квт и в квр.

или непосредственно от трансформаторных подстанций. Для более правильной оценки влияния длины ответвлений на технико-экономические показатели поперечно-замкнутой сети (вариант 3) и двухлучевой автоматизированной сети высокого напряжения с двумя подстанциями в квартале (вариант 2) дополнительно рассмотрен случай расположения зданий I и VI в середине квартала (показаны пунктиром на рис. 1). Здания VII и VIII отсутствуют. Здания I и VI целиком питаются от трансформаторных подстанций, расположенных в рассматриваемой половине квартала.

Существенное значение для построения сети низкого напряжения имеет вопрос о совместном или раздельном питании бытовой и силовой нагрузок. При этом имеется в виду, что совместное питание возможно только по наружной кабельной сети низкого напряжения. Внутридомовые проводки к бытовым и силовым приемникам тока во всех случаях должны быть раздельными. Вопрос о совместном или раздельном питании нагрузок рассматривался для всех вариантов.

Анализ показал, что экономические показатели двухлучевой автоматизированной сети высокого напряжения при совместном и раздельном питании бытовых и силовых нагрузок практически одинаковы. Лишь в некоторых случаях при раздельном питании нагрузок сеть может оказаться несколько более экономичной. Такие же результаты получены и для поперечно-замкнутой сети низкого напряжения. В отношении обеспечения качества электроэнергии варианты с совместным питанием бытовых и силовых нагрузок уступают вариантам с раздельным питанием.

В сложно-замкнутой сети низкого напряжения имеется значительное количество продольных и поперечных связей низкого напряжения, выполняемых одиночными линиями. Для обеспечения же раздельного питания бытовых и силовых нагрузок пришлось бы практически дублировать всю сеть, в результате чего она утратила бы все свои преимущества.

В дальнейшем схемы и экономические показатели всех вариантов сети приведены лишь для случая совместного питания нагрузок.

Сечение жил кабельных линий для всех вариантов определялось по допускаемой потере напряжения и проверялось по допускаемому току из условий нагрева в наиболее тяжелом аварийном режиме. В качестве аварийных рассматривались следующие режимы: отключение одного кабеля низкого напряжения на головном участке сети, отключение одного трансформатора, отключение линии высокого напряжения и т. п.

Ввиду необходимости дальнейшего развития сети жилы кабелей по всей длине одной магистрали или одного ответвления сети низкого напряжения выбирались одинакового сечения. Имея место стремление по возможности сократить количество различных марок кабелей низкого напряжения, применяемых в одном квартале.

Остановимся подробнее на рассматриваемых вариантах сети.

В варианте 1 (рис. 2) на каждые три здания имеется 1 сетевая подстанция с двумя трансформаторами по 240 ква, в квартале — 4 подстанции. Сетевые подстанции питаются от сдвоенных автоматизированных линий высокого напряжения,

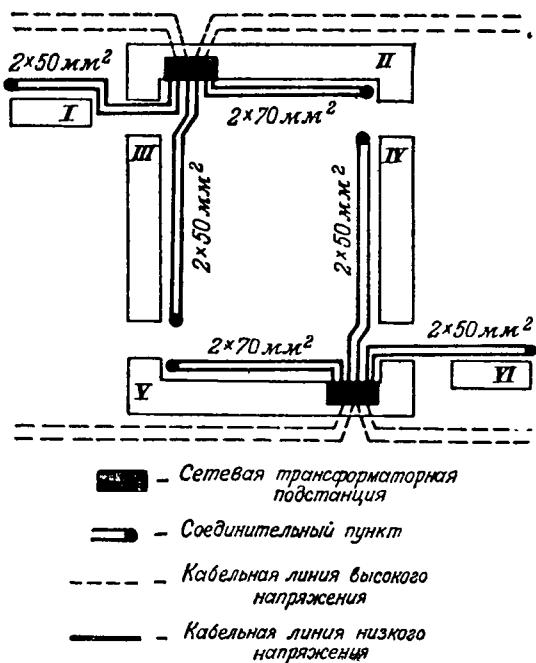


Рис. 2. (Вариант 1). Двухлучевая автоматизированная сеть высокого напряжения.

каждый трансформатор присоединяется к своей линии высокого напряжения. Для питания всей сети низкого напряжения в этом варианте требуются две сдвоенные высоковольтные линии. Каждое здание питается от сетевой подстанции двумя параллельными линиями. Нагрузки присоединяются к этим линиям в шахматном порядке. В конце каждой линии имеется соединительный пункт. В случае отключения головного участка одной из параллельных линий присоединенные к ней нагрузки будут питаться по другой линии после замыкания в соединительном пункте.

В варианте 2 (рис. 3) в каждой половине квартала имеется 1 сетевая подстанция с двумя трансформаторами по 420 ква, в квартале — 2 подстанции. От сетевой подстанции для питания зданий II и V прокладывается нормально разомкнутая посередине кольцевая сеть из двух кабельных линий. В месте деления кольца предусматривается соединительный пункт. Каждое из зданий III и IV питается непосредственно от сетевой подстанции по одной радиальной линии с соединительным пунктом на ее конце. При отключении линии, питающей здание III и IV, соединительный пункт позволяет перевести питание на одну из линий, идущих к зданию V. Здания I и VI пытаются сдвоенными радиальными линиями, отходящими от шин сетевой подстанции.

Для облегчения сети низкого напряжения, питающей здания I и VI, рассматривался дополнительный вариант с 3 сетевыми подстанциями на квартал, при котором здания I и VI питались от третьей дополнительной сетевой подстанции с двумя трансформаторами по 100 ква. Мощность трансформаторов основных подстанций уменьшалась до 320 ква. Магистральная сеть, питающая здания II, III, IV и V, оставалась без

изменений. Этот вариант дал снижение расхода меди на 20 %, но потребовал увеличения капиталовложений в сеть на 12 % и годовых эксплуатационных расходов на 20 %. Ввиду худших экономических показателей вариант с тремя подстанциями в квартале в дальнейшем подробно не рассматривается.

Вариант 2,а (рис. 4) отличается от варианта 2 (рис. 3) лишь расположением зданий I и VI (см. здания, показанные на рис. 1 пунктиром). При этом варианте изменяется сечение жил кабельных линий, питающих здания I и VI.

Вариант 3 представляет собой поперечно-замкнутую сеть низкого напряжения, охватывающую половину квартала (рис. 5). В каждой половине квартала имеются две однотрансформаторные подстанции с трансформаторами по 420 ква. Сетевые подстанции питаются по двум одиночным кабельным линиям высокого напряжения, проложенным вдоль двух улиц. Для питания зданий II, III, IV и V между подстанциями проложены две линии. Здания I, VI, VII и VIII питаются от показанных на рис. 5 и от соседних с ними подстанций по радиальным линиям. В середине зданий I, VI, VII и VIII находятся соединительные пункты, каждый из которых замыкается при отключении одной радиальной линии, питающей здание. При выборе сечений жил кабелей магистральной сети определяющим явилось отключение одного из трансформаторов, при этом предполагалось, что все магистрали оставались замкнутыми на шинах сетевой подстанции. Для сечений жил кабелей ответвлений к зданиям I, VI, VII и VIII определяющей явилась величина допустимой потери напряжения.

Разница между вариантами 3,а (рис. 6) и 3 заключается в том, что здания I и VI располагаются в середине квартала. При таком расположении эти здания питаются от сетевых подстанций рассматриваемого полуквартала. Длина ответвлений к ним значительно возрастает. Если питать здания I и VI непосредственно от шин сетевых подстанций, то сечение жил кабелей линий, по которым они питаются, следует взять равным $2 \times 95 \text{ mm}^2$ (из условия допустимой потери напряжения). Сечение же жил кабелей магистраль-

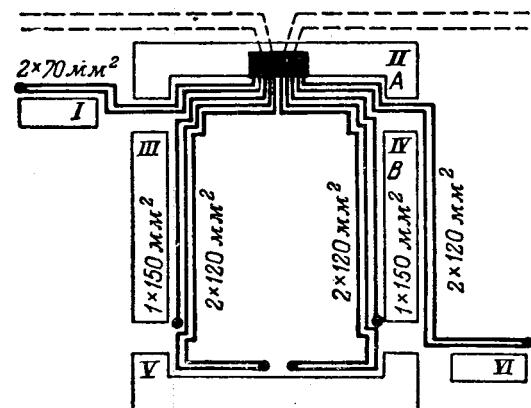


Рис. 3. (Вариант 2). Двухлучевая автоматизированная сеть высокого напряжения. Условные обозначения см. рис. 2.

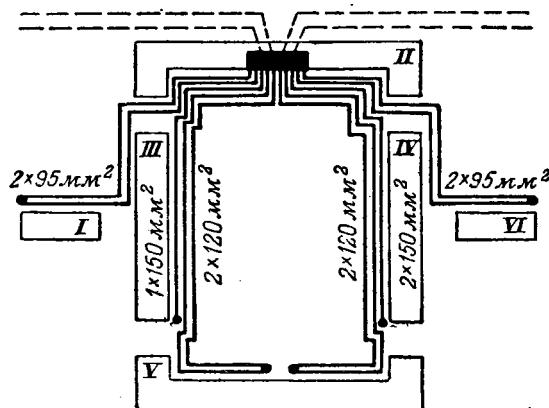
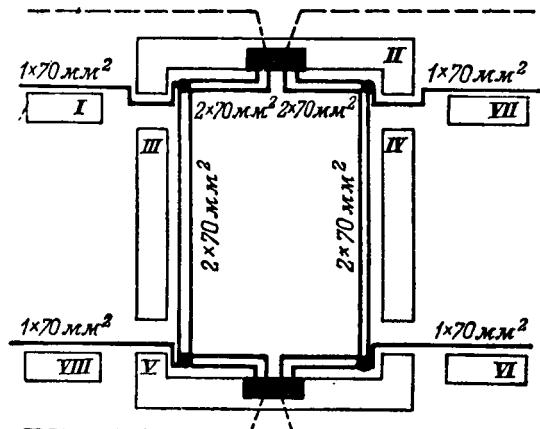


Рис. 4. (Вариант 2,а). Двухлучевая автоматизированная сеть высокого напряжения. Условные обозначения см. рис. 2.

ной сети, питающей здания II, III, IV и V, остается равным $2 \times 70 \text{ mm}^2$ (по току в аварийном режиме при отключении одной из линий высокого напряжения). Такое выполнение сети нецелесообразно. С точки зрения дальнейшего развития всю сеть следовало бы выполнить двойными кабельными линиями сечением жил 95 mm^2 . Поперечно-замкнутая сеть имеет недостаток, заключающийся в том, что при коротком замыкании на шинах одной из сетевых подстанций полностью прекращается питание потребителей здания I или VI. Поэтому здания I и VI более целесообразно питать от точек A и B (рис. 6), но тогда сечения жил кабелей на головных участках MA и NB необходимо увеличить до $2 \times 120 \text{ mm}^2$, чтобы сохранить прежнее значение наибольшей потери напряжения в сети, которое не превосходит допускаемого. Капиталовложения в сеть при этом практически остаются неизменными, но расход меди возрастает примерно на 10 %.

Вариант 4 — сложно-замкнутая сеть низкого напряжения, охватывающая ряд кварталов, подобных рассматриваемому. В каждой половине квартала (рис. 7) две однотрансформаторные



Гис. 5. (Вариант 3). Поперечно-замкнутая сеть низкого напряжения. Условные обозначения см. рис. 2.

подстанции с трансформаторами по 320 ква, в квартале 4 подстанции. Сетевые подстанции питаются в шахматном порядке от двух сдвоенных линий высокого напряжения, проложенных вдоль двух улиц (рис. 8). При отключении одной из линий высокого напряжения выходит из работы только четвертая часть всех трансформаторов. Это позволяет принять мощность отдельных трансформаторов равной 320 ква вместо 420 ква в варианте 3, где питание трансформаторов происходит от двух одиночных линий высокого напряжения.

Технико-экономические показатели всех рассмотренных вариантов сети (1, 2, 2а, 3, 3а и 4) приведены в таблице (см. стр. 18).

Как видно из этой таблицы, варианты 1, 2 и 2а (с двухлучевой автоматизированной сетью высокого напряжения) требуют одинаковых капитальных затрат. Распределение же этих затрат по элементам сети в отдельных вариантах неодинаково. Капитальные затраты на сетевые подстанции в варианте 1 в два раза больше, чем в варианте 2, так как в последнем одна сетевая под-

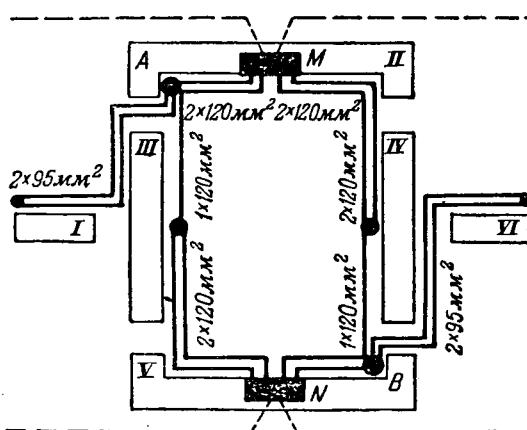


Рис. 6. (Вариант 3,а). Поперечно-замкнутая сеть низкого напряжения. Условные обозначения см. рис. 2.

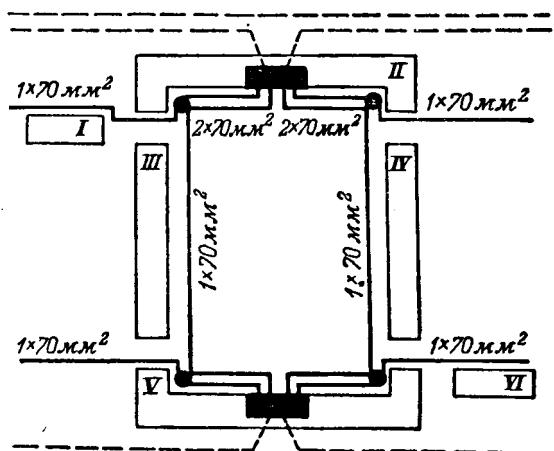


Рис. 7. (Вариант 4). Сложно-замкнутая сеть низкого напряжения. Условные обозначения см. рис. 2.

Наименование показателей	Единица измерения	Варианты					
		1	2	2a	3	3a	4
Протяженность кабеля трассы сети высокого напряжения	км	0,96 0,44	0,48 0,22	0,48 0,22	0,48 0,44	0,48 0,44	0,96 0,44
Протяженность кабеля трассы сети низкого напряжения	км	1,354 0,677	2,44 0,94	2,4 0,92	1,53 0,95	1,65 0,92	1,154 0,954
Погонная плотность нагрузки	квт·м	0,77	0,55	0,565	0,55	0,565	0,55
Потери мощности в сети низкого напряжения	квт	9,9	11,52	10,85	8,35	6,77	8,9
Потери мощности в трансформаторах	квт	12,36	10,36	10,36	10,36	10,36	9,15
Суммарные потери мощности	квт	22,26	21,88	21,21	18,7	17,13	18,05
Потери энергии в сети низкого напряжения	тыс. квтч	14,86	17,3	16,3	12,5	10,15	13,3
Потери энергии в трансформаторах	тыс. квтч	67,92	49,12	49,12	49,12	49,12	43,9
Суммарные потери энергии	тыс. квтч	82,78	66,42	65,42	61,62	59,27	57,2
Капиталовложения в сеть высокого напряжения	тыс. руб.	56,3	28,2	28,2	38,8	38,8	52,8
Капиталовложения в сеть низкого напряжения и соединительные пункты	тыс. руб.	42,6	130,45	126,9	53,4	82,8	38,6
Капиталовложения в сетевые подстанции	тыс. руб.	120,0	64,2	64,2	82,0	82,0	80,0
Суммарные капиталовложения	тыс. руб.	218,9	222,85	219,3	174,2	203,6	171,4
Капиталовложения для покрытия потерь мощности	тыс. руб.	33,4	32,9	31,8	28,1	25,7	27,1
Полные капиталовложения	тыс. руб.	252,3	255,75	251,1	202,3	229,3	198,5
Годовые эксплуатационные расходы по сети высокого напряжения	тыс. руб.	2,88	1,41	1,41	1,94	1,94	2,64
Годовые эксплуатационные расходы по сети низкого напряжения и соединительным пунктам	тыс. руб.	1,51	5,21	5,07	2,14	3,31	1,54
Годовые эксплуатационные расходы по сетевым подстанциям	тыс. руб.	9,6	5,14	5,14	6,56	6,56	6,4
Суммарные годовые эксплуатационные расходы	тыс. руб.	13,93	11,76	11,62	10,64	11,81	10,38
Стоимость потерь энергии	тыс. руб.	12,4	9,95	9,8	9,2	8,88	8,6
Полные годовые эксплуатационные расходы	тыс. руб.	26,33	21,71	21,42	19,84	20,69	18,98
Расход меди на сеть высокого напряжения	т	1,27	0,63	0,63	0,63	0,63	1,11
Расход меди на сеть низкого напряжения	т	2,34	8,68	8,38	3,3	5,47	2,48
Суммарный расход меди	т	3,61	9,31	9,01	3,93	6,1	3,58

станция, а в первом — две¹. Стоимость сети высокого напряжения в варианте 2 в два раза меньше. Однако эта экономия в затратах на сеть высокого напряжения и на сетевые подстанции достигается ценой значительного удорожания сети низкого напряжения и увеличения расхода металла на нее. В варианте 2 сеть низкого напряжения требует почти в 3,5 раза больших затрат и в 2,5 раза большего расхода металла, чем в варианте 1. Столь большое вложение цветного металла не приводит, однако, к существенному снижению потерь мощности и энергии в сети низкого напряжения.

Годовые эксплуатационные расходы в варианте 1 на 20% больше, чем в вариантах 2 и 2a. Это объясняется относительно большими отчислениями на амортизацию сетевых подстанций и

значительной стоимостью потерь энергии в трансформаторах.

Основным недостатком вариантов 2 и 2a является большой расход меди. Вариант 2 требует меди в 1,5...2,5 раза больше, чем другие варианты. На осуществление этого варианта сети придется израсходовать дополнительно около 6...10 кг меди на квартал, или 6...10 кг на 1 квт нагрузки.

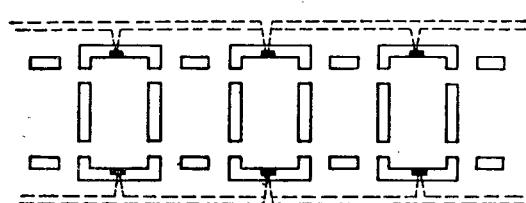


Рис. 8. Принципиальная схема питания сетевых трансформаторных подстанций в сложно-замкнутой сети низкого напряжения.

¹ Стоимость сетевой подстанции почти не зависит от мощности трансформаторов.

Варианты 3 и 4 (сложно-замкнутые и поперечно-замкнутые сети низкого напряжения) требуют практически одинаковых капиталовложений, годовых эксплуатационных расходов и затрат цветного металла.

Недостаток сложно-замкнутой сети низкого напряжения состоит в том, что экономические преимущества этой сети в полной мере могут выявиться лишь при полном ее развитии, когда она будет охватывать ряд кварталов. На отдельных этапах развития ее показатели будут несколько худшими. Ввиду того что сети сооружаются постепенно, по мере застройки районов, поперечно-замкнутая сеть может оказаться на практике более целесообразной и экономичной.

Сравнение замкнутых сетей низкого напряжения с двухлучевой автоматизированной сетью высокого напряжения и разомкнутой сетью низкого напряжения показывает экономические преимущества первых. Радиальные сети требуют капитальных затрат на 15...30% больше и эксплуатация их на 10...30% дороже, чем замкнутых сетей низкого напряжения.

Проведенный анализ показал, что наличие или отсутствие распределительных пунктов в сети высокого напряжения практически не влияет на выбор схемы сети низкого напряжения; изменяются лишь абсолютные цифры.

Выводы. 1. Лучшими экономическими характеристиками обладают замкнутые сети низкого напряжения: поперечно-замкнутая и сложно-замкнутая схемы.

2. Двухлучевые автоматизированные сети высокого напряжения имеют худшие экономические показатели как по годовым эксплуатационным расходам, так и по капиталовложениям. Уменьшение числа сетевых подстанций (2 подстанции на квартал) несколько улучшает экономические показатели сети, но резко удороожает сеть низкого напряжения и повышает расход цветного металла на нее в 1,5...2,5 раза.

3. Экономические показатели и требуемый расход цветного металла для сети низкого напряжения при совместном и раздельном питании бытовых и силовых нагрузок практически одинаковы.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЕТИ²

Сеть высокого напряжения — кабельная, напряжением 10 кв, проложена в блоках, сечение жил кабелей 50 мм². Сеть низкого напряжения — кабельная, напряжением 220/127 в, проложена в земле в траншеях. Расчетная потеря напряжения — 3%, для линий, питающих только силовые нагрузки, — 5%.

Изгибы, заходы, вводы и т. п. учитываются при определении протяженности сети путем увеличения в 1,25 величины, полученной в результате измерения на плане квартала.

Сетевые трансформаторные подстанции встроены в здания. Допускаемая аварийная перегрузка трансформаторов — 30% их номинальной мощности. При определении нагрузок трансформаторов коэффициент одновременности взят равным единице.

Продолжительность использования наибольшей нагрузки сети низкого напряжения — 3 000 час, трансформаторов — 3 500 час. Время наибольших потерь в сети низкого напряжения — 1 500 час, в трансформаторах — 2 000 час.

Отчисления на амортизацию³ и ремонт сетей низкого напряжения — 4%; сетей высокого напряжения — 5%, сетевых трансформаторных подстанций — 8%.

Стоимость 1 квт⁴ потерянной в сети энергии — 15 коп. Стоимость 1 квт установленной мощности на станциях системы — 1 500 руб.

Литература

1. А. А. Глазунов, И. С. Бессмертный и Ф. Воронцов. Основные положения построения схем городских электрических сетей. Электричество, № 12, 1952.

[23. 5. 1953]

² Составлены Ф. Ф. Воронцовым.

³ Процент на амортизацию сети высокого напряжения, хотя и прокладываемой в блоках, гринят большим, чем на амортизацию сети низкого напряжения, так как старение изоляции кабелей высокого напряжения более интенсивно, возможность их пробоя более вероятна.



Расчет токов и напряжений в цепях обмоток возбуждения возбудителя при форсировке и развозбуждении

Доктор техн. наук В. Л. ИНОСОВ и кандидат техн. наук Л. В. ЦУКЕРНИК
Институт электротехники Академии наук Украинской ССР

В энергосистемах эксплуатируются возбудители синхронных генераторов, возбуждение которых осуществляется или по принципу самовозбуждения или по принципу независимого возбуждения. На основе сотрудничества с Институтом электротехники Академии наук Украинской ССР по разработке и внедрению в производство устройств компаундирования и электромагнитного корректора напряжения (завод «Электросила» им. Кирова) внедряет для мощных генераторов возбудители со смешанной системой возбуждения, сочетающей независимое возбуждение от подвозбудителя и параллельное самовозбуждение.

Это сочетание осуществляется путем электрического соединения цепей независимого возбуждения и самовозбуждения на зажимах общей основной обмотки возбуждения возбудителя или посредством магнитной связи двух отдельных обмоток на главных полюсах возбудителя. К основной обмотке возбуждения возбудителя (обычно, к обмотке самовозбуждения) присоединяется цепь компаундирования по току нагрузки генератора.

В нормальном исполнении возбудителей односистемный и двухсистемный электромагнитный корректоры напряжения включаются, соответственно, на одну или на две дополнительные обмотки возбуждения возбудителя.

Таким образом, на практике в настоящее время могут встречаться схемы возбуждения возбуди-

телей с числом обмоток на главных полюсах, доходящим до четырех. К некоторым из этих обмоток присоединяются цепи с выпрямителями. Излагается методика расчета токов и напряжений в цепях выпрямителей при форсировке и развозбуждении и определения скорости изменения результирующего магнитного потока возбудителя.

Промышленностью внедряются новые системы возбуждения мощных генераторов с применением устройств компаундирования и электромагнитных корректоров напряжения. Системы содержат несколько обмоток на главных полюсах и цепи с полупроводниковыми выпрямителями. Излагается методика расчета токов и напряжений в цепях выпрямителей при форсировке и развозбуждении и определения скорости изменения результирующего магнитного потока возбудителя.

При форсировке и развозбуждении возможны значительные повышения тока в проводящем направлении и обратного напряжения на выпрямителях, присоединенных к обмоткам возбуждения возбудителя. В статье излагается методика расчета этих токов и напряжений и способ определения скорости изменения результирующего магнитного потока возбудителя при наличии нескольких обмоток на главных полюсах в соответствии со схемами смешанного возбуждения, показанными на рис. 1.

По этой методике следует производить расчеты и более простых схем параллельного или независимого возбуждения возбудителей при наличии компаундирования и электромагнитного корректора, включенного на одну или на две дополнительные обмотки.

По сути явлений переходные процессы в обмотках возбуждения возбудителя при резком изме-

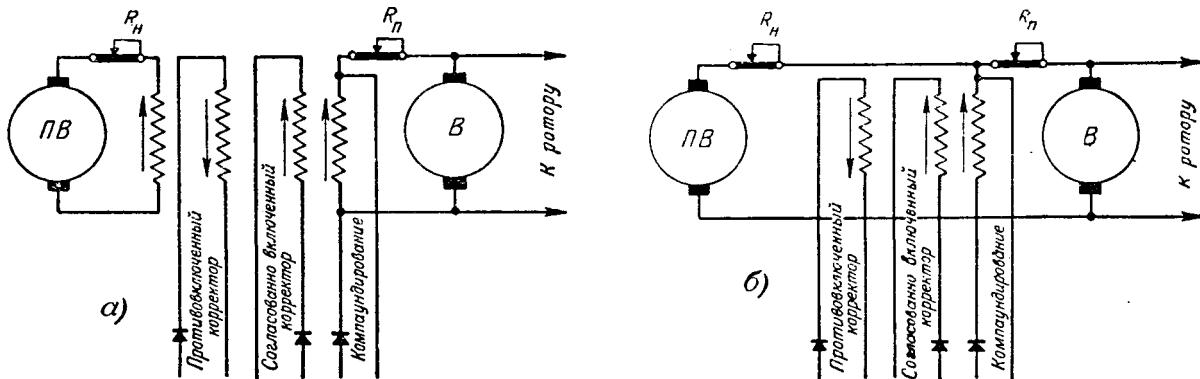


Рис. 1. Схема смешанного возбуждения.

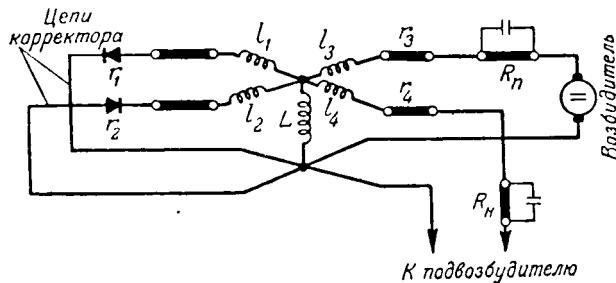


Рис. 2. Схема эквивалентного многообмоточного трансформатора.

r_1, r_2, r_3, r_4 — сопротивление обмоток возбуждения возбудителя (включая сопротивление выпрямителей); l_1, l_2, l_3, l_4 — индуктивности рассеяния; L — индуктивность, обусловленная результирующим магнитным потоком возбуждения; R_n, R_h — сопротивления реостатов параллельного и независимого возбуждения.

нении компаундирующего тока или сопротивления цепей возбуждения идентичны переходным процессам в трансформаторе с воздушным зазором при включении его на постоянное напряжение или при изменении сопротивления в его цепях. Поэтому указанные переходные явления можно изучать на эквивалентной схеме многообмоточного трансформатора, представленной на рис. 2, с той разницей, что одно из подводимых к трансформатору напряжений в случае параллельного самовозбуждения является функцией результирующего магнитного потока трансформатора (напряжение якоря возбудителя).

Предполагается, что все обмотки и параметры их цепей приведены к числу витков основной (например, параллельной) обмотки. В установившемся режиме э. д. с. самоиндукции (или взаимоиндукции) равна нулю, и ток каждой обмотки определяется делением ее напряжения на сопротивление цепи.

При резком изменении компаундирующего тока или сопротивления в одной из цепей, нарушается равенство между ΣE и ΣiR цепей, и закон Кирхгофа может удовлетворяться в первый момент только за счет э. д. с. самоиндукции. Если в какой-либо цепи, в которой протекает ток i_0 , сопротивление мгновенно изменилось на величину ΔR , то переходный процесс будет соответствовать схеме с измененными параметрами при увеличении или уменьшении приложенного напряжения на величину $E = i_0 \Delta R$.

В первый момент распределение токов по цепям останется неизменным, и э. д. с. самоиндукции распределяются соответственно индуктивностям цепей обмоток (рис. 3). При этом на всех внешних сопротивлениях изменение напряжения от э. д. с. взаимоиндукции равно нулю.

Индуктивность рассеяния значительно меньше индуктивности цепи результирующего магнитного потока, поэтому явления, обусловленные малыми постоянными времени рассеяния, затухают весьма быстро и уже вскоре после начала общего переходного процесса напряжения на обмотках определяются в основном только активными сопротивлениями цепей, а скорость протекания переходного процесса — общей индуктивностью и актив-

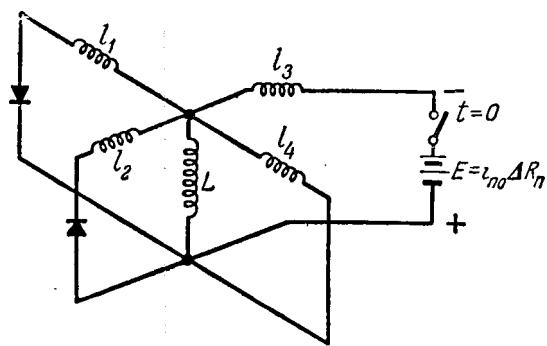


Рис. 3.

ными сопротивлениями цепей. По эквивалентной для этих представлений схеме (рис. 4) следует производить расчет обратных напряжений на запирающих вентилях и токов проводящих вентиляй.

Дополнительное напряжение в переходном процессе на обмотках, замкнутых на проводящие вентили или на активные сопротивления, будут меньше U_L на величину падения напряжения в сопротивлении обмотки от переходного тока (U_L — э. д. с., наводимая в эквивалентной обмотке L).

Результирующие напряжения на обмотках в начале переходного процесса можно определить наложением дополнительных напряжений переходного процесса на напряжение предшествовавшего установившегося режима.

Предшествовавшее установившееся напряжение на обмотках, замкнутых на вентили, запирающиеся при переходном процессе, противоположно по знаку дополнительному напряжению переходного процесса. Поэтому результирующее напряжение будет меньше дополнительного напряжения переходного режима, но для надежности при проверке электрической прочности выпрямителей следует учитывать только дополнительное напряжение переходного процесса.

Эквивалентные расчетные схемы рис. 5 соответствуют схемам возбуждения возбудителя по рис. 1 в предположении о равенстве нулю рассеяния обмоток. Расчетная схема рис. 5,в эквивалентна схеме возбуждения а рис. 1 при наличии самостоятельной обмотки для возбуждения по току. В зависимости от того, рассматривается ли случай форсировки или развозбуждения, следует во всех расчетных схемах полагать, согласно табл. 1, разомкнутыми цепи согласованно включенного корректора ($r_1 = \infty$ и компаундирования ($r_2 = \infty$) или противовключенного корректора ($r_2 = \infty$).

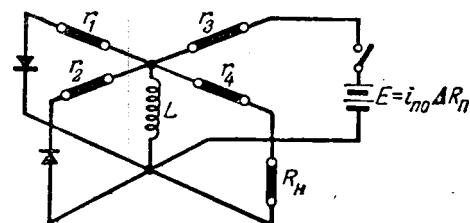


Рис. 4.

Таблица 1

Переходный процесс	Значение сопротивления в расчетной схеме
Форсировка возбуждения от увеличения компаундирующего тока или от изменения сопротивлений R_n и R_h	$r_1 = \infty; r_k = \infty$
Развозбуждение от уменьшения компаундирующего тока или от изменения сопротивлений R_n и R_h	$r_2 = \infty$

Сопротивление полупроводниковых выпрямителей в проводящем направлении следует определять по их вольтамперной характеристике в соответствии с протекающим через выпрямители током.

Для первого момента переходного процесса при изменении сопротивления цепей параллельного или независимого возбуждения:

$$E_n = i_{n_0} \Delta R_n; \quad E_h = i_{h_0} \Delta R_h; \quad (1)$$

$$\Delta R_n = R_{n_0} - R'_n; \quad \Delta R_h = R_{h_0} - R'_h. \quad (2)$$

Для расчетной схемы (рис. 5, а) можно получить:

$$U_L = \frac{E_n Y_{nL} + E_h Y_{hL}}{Y_{LL}}, \quad (3)$$

где Y_{LL} , Y_{nL} и Y_{hL} — собственная и взаимные проводимости схемы относительно точки присоединения индуктивности L .

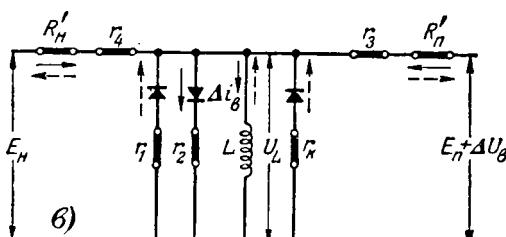
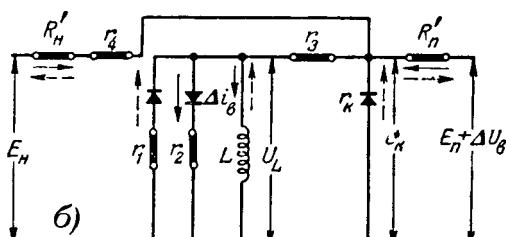
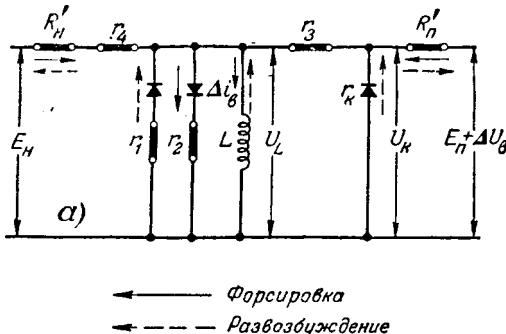


Рис. 5. (Сопротивление выпрямителей в проводящем направлении учитывается в значениях сопротивлений r_1 , r_2 и r_3).

Для схемы рис. 5, а

$$Y_{LL} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{R'_n + r_n} + \frac{1 + \frac{R'_n}{r_n}}{R'_n + r_3 + \frac{R'_n r_3}{r_k}},$$

$$Y_{nL} = \frac{1}{R'_n + r_3 + \frac{R'_n r_3}{r_k}}, \quad (4)$$

$$Y_{hL} = \frac{1}{R'_h + r_4}.$$

Для схемы рис. 5, в при компаундировании посредством отдельной обмотки

$$Y_{LL} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{R'_n + r_3} + \frac{1}{R'_h + r_4} + \frac{1}{r_k},$$

$$Y_{nL} = \frac{1}{R'_n + r_3}, \quad (5)$$

$$Y_{hL} = \frac{1}{R'_h + r_4}.$$

Если переходный процесс начинается при неизменных сопротивлениях цепей вследствие внезапного увеличения компаундирующего напряжения (на ΔU_k) или компаундирующего тока (на Δi_k), что возможно при отсутствии или запаздывании релейно-контакторного устройства форсировки или развозбуждения, то для схемы рис. 5, а получим:

$$U_L = \Delta U_k \frac{Y_{kL}}{Y_{LL}}, \quad (6)$$

$$U_L = \Delta i_k \frac{Y_{kL}}{Y_{kk} Y_{LL}},$$

где Y_{kk} — собственное сопротивление схемы относительно точки присоединения L , а Y_{kL} — взаимное сопротивление: $Y_{kL} = \frac{1}{r_3}$.

Для схемы рис. 5, в соответственно:

$$U_L = \Delta U_k,$$

$$U_L = \frac{\Delta i_k}{Y_{LL}}. \quad (7)$$

В приведенных общих выражениях для собственных и взаимных сопротивлений расчетной схемы следует полагать $r_1 = \infty$, $r_2 = \infty$ и $r_k = \infty$ в соответствии с табл. 1.

Для схемы смешанного возбуждения по рис. 1, б эквивалентная расчетная схема показана на рис. 5, в, в соответствии с которой рассчитываются собственные и взаимные проводимости для определения U_L .

Полученное во всех случаях значение U_L , будучи приведенным к действительному числу витков каждой обмотки, дает обратное напряжение на выпрямителях, запирающихся при данном переходном процессе (табл. 1).

Токи, протекающие в цепях остальных обмоток и через выпрямители, открытые при данном пере-

ходном процессе, определяются делением приведенного к данной обмотке напряжения U_L на взаимное сопротивление цепи этой обмотки относительно точки приложения напряжения U_L .

Для всех расчетных схем можно учесть влияние вихревых токов в стали возбудителя путем присоединения эквивалентного сопротивления $r_{\text{вт}}$ параллельно индуктивности L .

На основе полученных выше соотношений, определяющих повышение напряжения на эквивалентной индуктивности цепи возбуждения возбудителя в первый момент форсировки или развозбуждения, можно непосредственно определить для первого момента времени скорость изменения результирующей намагничивающей силы возбудителя (полного тока возбуждения возбудителя):

$$\frac{di_{\text{в}}}{dt_{t=0}} = \frac{U_L}{L}, \quad (8)$$

где индуктивность L определяется по известным значениям постоянной времени обмотки $T_{\text{об}}$ и сопротивления $r_{\text{об}}$ одной из обмоток возбуждения возбудителя¹

$$L = T_{\text{об}} r_{\text{об}}. \quad (9)$$

Величина $\frac{di_{\text{в}}}{dt_{t=0}}$ может быть использована для сравнительной оценки быстродействия различных вариантов схем возбуждения возбудителей.

Из-за наличия составляющей параллельного возбуждения и нелинейности нагрузочной характеристики возбудителя $U_{\text{в}} = f(i_{\text{в}})$ невозможно в общем виде выразить зависимость от времени напряжения на зажимах возбудителя в период форсировки или после ее прекращения. Однако полученные соотношения позволяют сравнительно легко получить эту зависимость методом последовательных интервалов.

В начале первого интервала известны $U_{\text{в0}}$; $i_{\text{в0}}$; $U_{L(0)}$; E_n ; E_{n0} .

Изменение тока $i_{\text{в}}$ за n -ый интервал времени Δt :

$$\Delta i_{\text{в}(n)} = \frac{U_{L(n-1)}}{L} \Delta t, \quad (10)$$

следовательно, в конце n -ого интервала

$$i_{\text{в}(n)} = i_{\text{в}(n-1)} + \Delta i_{\text{в}(n)}. \quad (11)$$

По нагрузочной характеристике возбудителя $U_{\text{в}=f(i_{\text{в}})}$ находим новые значения $U_{\text{в}(n)}$ и U_L в конце рассчитываемого интервала. Например для схемы по рис. 5,а для конца n -ого интервала

$$U_{L(n)} = \frac{(E_n + U_{\text{в}(n)} - U_{\text{в0}}) Y_{nL} + E_n Y_{nL} - (i_{\text{в}(n)} - i_{\text{в0}})}{Y_{LL}}. \quad (12)$$

Для других расчетных случаев также легко получаются соответствующие значения $U_{L(n)}$.

Переходя к расчету последующего интервала снова определяются в той же последовательности

¹ $T_{\text{об}}$ указываются обычно при разомкнутых других обмотках и при магнитно-ненасыщенном возбудителе.

$$\left. \begin{aligned} \Delta i_{\text{в}(n+1)} &= \frac{U_{L(n)}}{L} \Delta t \\ \text{и} \quad i_{\text{в}(n+1)} &= i_{\text{в}(n)} + \Delta i_{\text{в}(n+1)} \text{ и т. д.} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Описанный метод расчета позволяет также учесть влияние изменения компаундирующего тока на процесс изменения напряжения возбудителя. Для этого в начале первого интервала должно быть также известно значение составляющей компаундирующего тока в полном токе возбуждения возбудителя $i_{\text{вк}(0)}$. В конце первого интервала определяется новое значение $i_{\text{вк}(1)}$ в соответствии с изменением тока статора. Полный ток возбуждения возбудителя в конце расчетного интервала

$$\left. \begin{aligned} i_{\text{в}(n)} &= i_{\text{в}(n-1)} + \Delta i_{\text{в}(n)} + \Delta i_{\text{вк}(n)}, \\ \text{где} \quad \Delta i_{\text{вк}(n)} &= i_{\text{вк}(n)} - i_{\text{вк}(n-1)}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Зная изменение компаундирующего тока, можно по вольтамперной характеристике выпрямителей уточнять сопротивление r_k в каждом интервале времени. Кроме того, следует учитывать также в каждом интервале времени изменение индуктивности L вследствие магнитного насыщения возбудителя.

Пример. Расчет производится для схемы смешанного возбуждения мощного гидрогенератора по рис. 1. Данные обмоток, сопротивления реостатов и выпрямителей, а также расчетных режимов приведены в табл. 2.

В качестве расчетных режимов принята полная нагрузка генератора с низким коэффициентом мощности и форсировка возбуждения при трехфазном коротком замыкании на зажимах генератора. Ток компаундирования возрастает в первый момент короткого замыкания до значения, превышающего в 1,5 раза указанное в табл. 2 значение, установленное в конце форсировки. Одновременно срабатывает релейная форсировка в цепях R_n и R_{n0} . Форсировка прекращается одновременно с отключением генератора.

Напряжение независимого возбуждения — 230 в (приведенное к обмотке параллельного возбуждения — 55,3 в).

Выпрямители собраны по трехфазной мостовой схеме. Они собраны из селеновых выпрямительных элементов диаметром 100 мм. В выпрямителе компаундирования число последовательно соединенных элементов в плече моста составляет 16, а параллельно 4; в выпрямителе корректора в плече 12 последовательно соединенных элементов и 2 параллельно. На основании данных табл. 2 определяем для начала форсировки:

$$\begin{aligned} \Delta R_n &= 3,06 - 0,927 = 2,133 \text{ ом}; \quad \Delta R_{n0} = 0,684 \text{ ом}; \\ E_n &= i_{n0} \Delta R_n = 118 \cdot 2,133 = 252 \text{ в}; \quad E_{n0} = i_{n0} \Delta R_{n0} = 58,5 \cdot 0,684 = \\ &= 40 \text{ в}; \quad \Delta i_k = 1,5 \cdot 102 - 33 = 120 \text{ а}. \end{aligned}$$

Полагая, согласно табл. 1 $r_1 = \infty$ и $r_k = \infty$, находим собственные и взаимные сопротивления в первый момент форсировки:

$$Y_{LL} = \frac{1}{0,36} + \frac{1}{0,266} + \frac{1}{0,927 + 0,117} = 7,5;$$

$$Y_{kk} = \frac{1}{0,927} + \frac{1}{0,117 + \frac{0,36 \cdot 0,266}{0,36 + 0,266}} = 4,78;$$

$$Y_{nL} = \frac{1}{0,927 + 0,117} = 0,957; \quad Y_{nL} = \frac{1}{0,266} = 3,76 \text{ в};$$

$$Y_{kL} = \frac{1}{0,117} = 8,5.$$

Исходные расчетные данные

Название цепи	Сопротивление обмотки, ом	Сопротивление выпрямителей, ом	Постоянная времени обмотки, сек	Число витков обмотки	Сопротивление цепей с учетом выпрямителей (ом), приведенные к обмотке параллельного возбуждения (30 витков)		Ток, а	
					нормальный режим	режим форсировки возбуждения	нормальный режим	режим форсировки возбуждения
Независимое возбуждение	4,62	—	0,96	125	0,266	0,266	58,5	208
Согласованно включенный корректор	16,1	5,0	0,2	115	1,44	1,44	15,5	0
Противовключенный корректор	9,3	5,0	1,1	190	0,36	0,36	0	0
Параллельное самовозбуждение	0,117	—	1,94	30	0,117	0,117	—	—
Компаундирование	—	0,167	—	—	0,167	0,167	33	102
Шунтовой реостат	3,06	—	—	—	3,06	0,927	118	640
Реостат независимого возбуждения	11,8	—	—	—	0,684	0	—	—

Напряжение возбудителя: нормальный режим 380 в; режим форсировки возбуждения 680 в.

Полный ток возбуждения возбудителя: нормальный режим 225 а; режим форсировки возбуждения 950 а.

Находим:

$$U_L = \frac{E_n Y_{nL} + E_n Y_{nL} + \Delta i_e \frac{Y_{KL}}{Y_{KK}}}{Y_{LL}} = \frac{252 \cdot 0,957 + 40 \cdot 3,76 + 120 \frac{8,5}{4,78}}{7,5} = 80,9 \text{ в.}$$

Обратное напряжение выпрямителя согласованно включенного корректора:

$$U_{1\max} = 80,9 \frac{115}{30} = 310 \text{ в.}$$

Обратное напряжение, приходящееся на выпрямительный элемент:

$$U = \frac{U_{1\max}}{2n} = \frac{310}{2 \cdot 12} \approx 13 \text{ в,}$$

что вполне допустимо.

Для определения скорости нарастания тока возбуждения найдем зависимость постоянной времени обмотки возбуждения от тока возбуждения по формуле (с учетом насыщения):

$$T = T_0 \left[(1 - \sigma) \frac{\left(\frac{dU}{di_e} \right)_0}{\left(\frac{dU}{di_e} \right)_0} + \sigma \right] = T_0 K_m, \quad (15)$$

где T_0 — постоянная времени, найденная для линейной

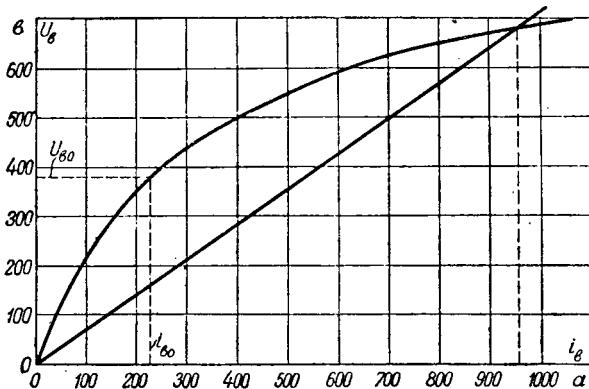


Рис. 6.

части характеристики; T — постоянная времени для заданного значения тока возбуждения; $\left(\frac{dU}{di_e} \right)_0$ — тангенс угла наклона линейной части характеристики холостого хода; $\left(\frac{dU}{di_e} \right)_0$ — тангенс угла наклона характеристики холостого хода для заданного тока возбуждения; σ — коэффициент рассеяния системы возбуждения.

Принимая $\sigma = 0,15$ и пользуясь характеристикой холостого хода возбудителя (рис. 6), строим зависимость от тока возбуждения коэффициента K_m , учитывающего снижение постоянной времени от насыщения (рис. 7).

По рис. 7 для тока возбуждения $i_e = 225$ а, $K_m = 0,51$.

Вычисляем по (8) скорость нарастания тока возбуждения в первый момент времени:

$$\frac{di_e}{dt_{t=0}} = \frac{U_{L(0)}}{L} = \frac{U_{L(0)}}{T_0 K_m} = \frac{80,9}{1,94 \cdot 0,117 \cdot 0,51} = 700 \text{ а/сек.}$$

Выбирая интервал времени $\Delta t = 0,02$ сек, находим:

$$\Delta i_e(1) = \frac{di_e}{dt_{t=0}} \Delta t = 700 \cdot 0,02 = 14 \text{ а.}$$

Ток возбуждения к концу первого интервала

$$i_e(1) = 225 + 14 = 239 \text{ а.}$$

По характеристике холостого хода (рис. 6) находим напряжение возбудителя $U_e = 390$ в.

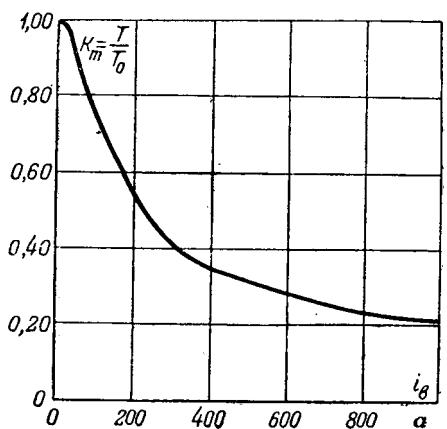


Рис. 7.

Определяем новое значение $U_{L(1)}$:

$$U_{L(1)} = \frac{(E_n + U_{\theta(1)} - U_{\theta 0}) Y_{nL} + E_n Y_{nL} - (i_{\theta(1)} - i_{\theta 0}) + \Delta i_{\kappa} \frac{Y_{\kappa L}}{Y_{\kappa\kappa}}}{Y_{LL}} =$$

$$= \frac{(252 + 390 - 380) \cdot 0,957 + 40 \cdot 3,76 - (239 - 225) + 120 \frac{8,5}{4,78}}{7,5} =$$

$$= 80,5 \text{ в.}$$

Новое приращение тока

$$\Delta i_{\theta(2)} = \frac{80,5 \cdot 0,02}{1,94 \cdot 0,117 \cdot 0,485} = 14,6 \text{ а.}$$

Ток в конце второго интервала, т. е. ко времени $t = 0,04$ сек, будет:

$$239 + 14,6 = 253,6 \text{ а и } U_{\theta(2)} = 405 \text{ в.}$$

Продолжая расчет, находим кривую роста тока возбуждения и напряжения на возбудителе (рис. 8).

В соответствии с ГОСТ 183-41 определяем по рис. 8 быстродействие возбудителя. Средняя скорость роста напряжения за время 0,5 сек оказалась 520 в/сек или 1,37-кратная номинальному напряжению.

Интересно отметить, что ток в обмотке возбуждения при форсировке изменяется почти линейно.

Если бы релейная форсировка осуществлялась только в цепи шунтового реостата, то для обеспечения такого же установившегося "потолка" возбуждения 680 в потребовалось бы (табл. 2) уменьшить сопротивление шунтового реостата до

$$R_n' = \frac{680 - 950 \cdot 0,117}{950 - 102 - 58,5} = 0,72 \text{ ом,}$$

тогда

$$\Delta R_n = 3,06 - 0,72 = 2,34 \text{ ом;}$$

$$E_n = i_{n0} \Delta R_n = 118 \cdot 2,34 = 276 \text{ в;}$$

$$E_n = 0, \Delta i_{\kappa} = 120 \text{ а.}$$

$$Y_{LL} = \frac{1}{0,36} + \frac{1}{0,684 + 0,266} + \frac{1}{0,72 + 0,117} = 5,03;$$

$$Y_{\kappa\kappa} = \frac{1}{0,72} + \frac{1}{0,117 \frac{0,36 \cdot 0,95}{0,36 + 0,95}} = 3,85;$$

$$Y_{nL} = \frac{1}{0,72 + 0,117} = 1,2; \quad Y_{\kappa L} = \frac{1}{0,117} = 8,5;$$

$$U_L = \frac{276 \cdot 0,72 + 120 \frac{8,5}{3,85}}{5,03} = 92,3 \text{ в.}$$

Следовательно, по сравнению с ранее рассчитанным вариантом в рассматриваемом варианте с релейной форсировкой, воздействующей только на цепь параллельного возбуждения, увеличивается повышение напряжения на $(\frac{92,3}{80,9} - 1) \cdot 100 = 14\%$, что вполне допустимо для выпрямителей. Одновременно и скорость нарастания полного тока возбуждения возбудителя в первый момент форсировки также увеличивается на 14%, что является желательным. В данном случае увеличение U_L происходит за счет составляющей от компаундирования. При отсутствии же компаундирования было бы значительно более эффективным воздействие релейной форсировки одновременно и на R_n и на R_{κ} .

Произведем расчет для первого момента после прекращения форсировки, воздействующей на R_n и R_{κ} . Согласно табл. 2

$$E_n = i_{n0} \Delta R_n = 640 \cdot 2,133 = 1365 \text{ в;}$$

$$E_{\kappa} = i_{\kappa 0} \Delta R_{\kappa} = 208 \cdot 0,684 = 142 \text{ в; } \Delta i_{\kappa} = 102 \text{ а.}$$

$$Y_{LL} = \frac{1}{1,44} + \frac{1}{0,684 + 0,266} + \frac{1 + \frac{3,06}{0,167}}{3,06 + 0,117 + \frac{3,06 \cdot 0,117}{0,167}} =$$

$$= 5,38;$$

$$Y_{\kappa\kappa} = \frac{1}{3,06} + \frac{1}{0,167} + \frac{1}{0,117 + \frac{1,44 \cdot 0,95}{1,44 + 0,95}} = 7,76;$$

$$Y_{nL} = \frac{1}{3,06 + 0,117 + \frac{3,06 \cdot 0,117}{0,167}} = 0,188;$$

$$Y_{\kappa L} = \frac{1}{0,95} = 1,05; \quad Y_{\kappa L} = \frac{1}{0,117} = 8,5;$$

$$U_L = \frac{1365 \cdot 0,188 + 142 \cdot 1,05 + 102 \frac{8,5}{7,76}}{5,38} = 94,0 \text{ в.}$$

Действительное обратное напряжение на выпрямительном противовключенного корректора:

$$U_{2\max} = 94,0 \frac{190}{30} = 607 \text{ в.}$$

Обратное напряжение, приходящееся на один выпрямительный элемент,

$$U = \frac{607}{2 \cdot 12} \approx 25,4 \text{ в,}$$

что допустимо для рассматриваемого кратковременного режима.

Как видно из расчета, условия, в которых в данной схеме находится противовключенный корректор, в момент прекращения форсировки возбуждения являются более тяжелыми, чем для согласованно включенного корректора в момент начала форсировки.

Ток, протекающий через выпрямители компаундирования, в момент прекращения форсировки

$$i_{\kappa\max} = \frac{94,0}{0,167} = 563 \text{ а.}$$

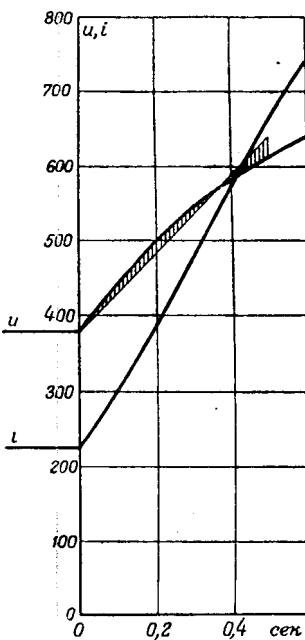


Рис. 8.

Этот ток распределяется между параллельными ветвями всех трех фаз. На каждую ветвь приходится $\frac{563}{3 \cdot 16} = 11,7 \text{ а.}$ что вполне допустимо даже с учетом возможной неравномерности распределения тока по параллельным ветвям.

Укажем, что если выпрямители компаундирования имели бы в два раза большее число последовательно соединенных пластин, то обратное напряжение на выпрямителях противовключенного корректора получилось бы почти в 1,5 раза больше. Кроме того, мощность, рассеиваемая в выпрямителях компаундирования, в первый момент после прекращения форсировки была бы порядка 100 квт. Таким образом, не следует без необходимости увеличивать число

последовательно соединенных элементов выпрямителей компаундирования.

Интересно отметить, что расчет, проведенный для случая отсутствия компаундирования и электромагнитного корректора напряжения и связанных с ними цепей, показал, что при прочих равных условиях скорость нарастания напряжения возбудителя практически остается той же, а именно 520 в/сек.

Приведенный примерный расчет показывает, что предлагаемым методом можно успешно анализировать условия работы сложных схем возбуждения возбудителей мощных синхронных генераторов при ударном возбуждении или развозбуждении.

[17.2.1953]

◆ ◆ ◆

Пуск и реверс электродвигателей постоянного тока последовательного возбуждения

Доктор техн. наук, проф. Н. П. ЕРМОЛИН

Ленинградский электротехнический институт им. Ленина

Процессы пуска и реверса электродвигателей постоянного тока являются важнейшими режимами работы современного электрического привода. Однако при проектировании электрических машин и систем электропривода постоянного тока расчет этих процессов обычно производится без учета ряда факторов, влияющих на поведение машины при неустановившихся режимах. Особенно затруднителен расчет этих режимов для двигателей последовательного возбуждения.

Рассматривается методика расчета пуска и реверса двигателей постоянного возбуждения с намагничивания, реакции магнитной системы машины. Иллюстрируются числовые примеры.

Для получения совпадающих с опытом результатов расчета требуется учесть нелинейность кривой намагничивания, влияние реакции якоря и вихревых токов магнитной системы машины, чему посвящена настоящая статья.

Рассматривается методика расчета процессов пуска и реверса двигателей постоянного тока последовательного возбуждения с учетом нелинейности кривой намагничивания, реакции якоря и вихревых токов магнитной системы машины. Результаты расчета иллюстрируются числовыми примерами и опытными данными.

расчета процессов пуска
сиянного тока последова-
етом нелинейности кривой
якоря и вихревых токов
ы. Результаты расчета
и примерами и опытными
ыми.

$$\left. \begin{aligned} U &= c\Omega(\Phi_o + \Phi) + (r_a + r_c + R)I + \Delta U_{\text{in}}, \\ c(\Phi_o + \Phi)I &= 9.81(M_{co} + A\Omega'), \\ I &= a_c\Phi + b_c\Phi^q \frac{F_R}{2W_c}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где: U — напряжение на зажимах машины, в;
 I — ток якоря, а;
 Φ_o и Φ — поток остаточного магнетизма и полез-
 ный результирующий поток главного
 полюса, мкс (рис. 1);

Ω — угловая скорость вращения якоря, $1/\text{сек}$;
 r_a и r_c — электрические сопротивления цепи якоря и обмотки возбуждения, ом ;

— сопротивление пускового реостата, $ом$;
 ΔU_{u_4} — переходное падение напряжения в контакте щеток и коллектора [Л. 1], $в$;
 F_R — суммарная н. с. поперечной, продольной и коммутационной реакции якоря, принимаемая пропорциональной току якоря.

M_{co} — постоянная составляющая нагрузочного момента на валу двигателя, кгм (рис. 2):

$A\Omega'$ — переменная составляющая этого момента (рис. 2);

W_c — число витков обмотки возбуждения на полюс;

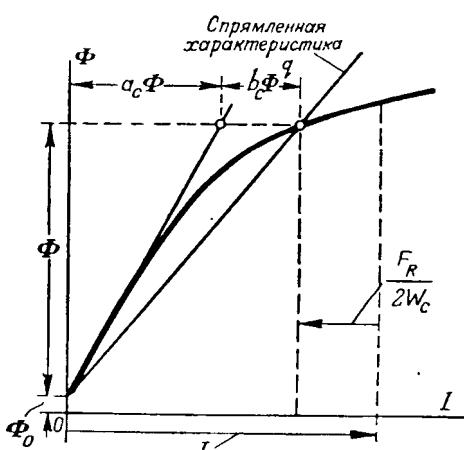


Рис. 1. Кривая намагничивания двигателя.

$c = \frac{N}{2\pi} \frac{p}{a} 10^{-8}$ — постоянная обмотки якоря;
 q — показатель степени выражения, аппроксимирующего кривую намагничивания машины (рис. 1), целое число, равное 3...5 [Л. 1].

При пуске в ход или реверсе уравнения (1) примут следующий вид [Л. 1]:

$$\left. \begin{aligned} c\Phi_o\omega' + c\varphi'\omega' + (r_a + r_c + R)i' + a_{\omega} + b_{\omega}i + \\ + L_a \frac{di'}{dt} + 2pW_c \frac{d\varphi''}{dt} 10^{-8} = u', \\ c\Phi_o i' + c\varphi' i' = 9,81 \cdot M_{co} + \\ + 9,81 A\Omega_n \omega' + 9,81 \Theta \frac{d\omega'}{dt}, \\ i' = a_c \varphi' + b_c \varphi'^q + \frac{F_R}{2W_c} - \frac{F_{ex}}{2W_c}, \\ \varphi'' = \varphi' + \gamma_s \lambda_s (2W_c a_c \varphi' + 2W_c b_c \varphi'^q + F_R i), \\ \frac{F_{ex}}{F_c} = 0,75 \cdot \frac{3}{2} (\varphi - b), \\ b = (\beta - 3b_o) e^{-3\lambda_{ex} \cdot t} + \\ + 3e^{-3\lambda_{ex} \cdot t} \int \left(\frac{d\varphi}{dt} + \lambda_{ex} \varphi \right) e^{3\lambda_{ex} \cdot t} dt, \end{aligned} \right\} (2)$$

где: L_a — индуктивность обмоток якоря и добавочных полюсов, гн ;

F_{ex} — эквивалентная н. с. вихревых токов в массивных частях магнитной системы двигателя [Л. 1],

$\Theta = \frac{GD^2}{4g}$ — момент инерции вращающихся маховых масс агрегата, $\text{кгм} \cdot \text{сек}^2$,

GD^2 — маховой момент масс агрегата, кгм^2 (остальные обозначения даны в [Л. 1]).

После исключения в системе (2) части неизвестных путем подстановки их из одних уравнений в другие и деления первого уравнения на номинальную э. д. с. якоря $E_n = c\Omega_n \Phi_a$ и второго — на номинальный вращающий момент $M_n = c\Phi_a I_a$, получается следующая система нелинейных дифференциальных уравнений пуска и реверса электродвигателя последовательного возбуждения:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\varphi}{dt} = \frac{(1 - f_R)(\epsilon u - \epsilon_{\omega} - \epsilon_a i - \epsilon_o \omega - \varphi \omega) - 3\lambda_{ex}(T_a + T_{cR})f_{ex}}{(1 - f_R)(T_c + T_c' q \varphi^{q-1}) + (2,25 + i'_a + i''_a q \varphi^{q-1})(T_a + T_{cR})}, \\ \frac{di}{dt} = \left(\frac{2,25 + i'_a + i''_a q \varphi^{q-1}}{1 - f_R} \right) \frac{d\varphi}{dt} + \frac{3\lambda_{ex}}{1 - f_R} \cdot f_{ex}, \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{\epsilon_o}{T_n} i + \frac{1}{T_n} \varphi i - \frac{\epsilon_{\omega}}{T_n} \omega' - \frac{\epsilon_{mo}}{T_n}, \\ \frac{df_{ex}}{dt} = -2,25 \cdot \frac{d\varphi}{dt} - 3\lambda_{ex} f_{ex}. \end{aligned} \right\} (3)$$

Здесь все величины даны в относительных величинах, волях номинальных значений: поток φ волях Φ_a ; ток якоря i волях I_a ; скорость враще-

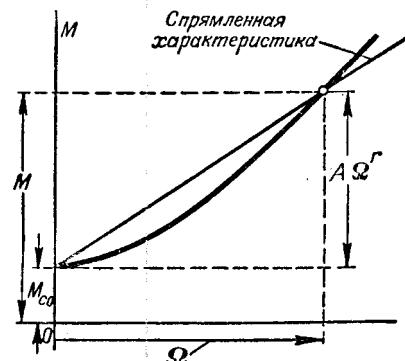


Рис. 2. Нагрузочный момент двигателя.

ния волях Ω_n ; н. с. вихревых токов f_{ex} волях F_c ; напряжение на зажимах машины u волях U_n .

Относительные падения напряжения:

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_a = \frac{(r_a + r_c + R)I_a + b_{\omega}}{E_n}, \\ \epsilon_{\omega} = \frac{a_{\omega}}{E_n}; \quad \epsilon_o = \frac{\Phi_o}{\Phi_a}; \quad \epsilon = \frac{U}{E_n}; \end{aligned} \right\} (3a)$$

относительные токи возбуждения и н. с. реакции якоря:

$$i'_a = \frac{a_c \Phi_a}{I_a}; \quad i''_a = \frac{b_c \Phi_a^q}{I_a}; \quad f_R = \frac{F_R}{2W_c I_a}; \quad (3b)$$

относительные моменты

$$\epsilon_{\omega} = \frac{9,81 A \Omega_n'}{c \Phi_a I_a}; \quad \epsilon_{mo} = \frac{9,81 M_{co}}{c \Phi_a I_a}. \quad (3b)$$

Постоянные времени машины при номинальных условиях:

$$\left. \begin{aligned} T_a = \frac{L_a I_a}{E_n}; \quad T_c' = \frac{2pW_c (1 + 2W_c a_c \gamma_s \lambda_s) \Phi_a 10^{-8}}{E_n}; \\ T_c'' = \frac{2pW_c \cdot 2W_c b_c \Phi_a^q \gamma_s \lambda_s 10^{-8}}{E_n}; \quad T_c = T_c' + \frac{1}{2} q T_c'', \\ T_{cR} = \frac{2pW_c \gamma_s \lambda_s F_R 10^{-8}}{E_n}; \quad T_n = \frac{GD^2 \Omega_n}{4c \Phi_a I_a}, \end{aligned} \right\} (3c)$$

λ_{ex} — коэффициент затухания вихревых токов в массивных частях магнитной системы машины [Л. 1]; при этом:

$\gamma_s = 0,70 \dots 0,80$ — коэффициент сцепления потока рассеяния с обмоткой возбуждения,

$\lambda_s = \frac{(\sigma - 1) \Phi_a}{2W_c I_a}$ — магнитная проводимость путей замыкания потоков рассеяния в воздухе,

$\sigma = 1,1 \dots 1,2$ — коэффициент магнитного рассеяния,

$E_n = c \Omega_n \Phi_a$ — номинальная э. д. с. якоря.

Нелинейную систему (3) удобнее всего решить методом последовательных приближений:

$$\left. \begin{aligned}
 \Delta \varphi &= \left[\frac{(1-f_R)(\epsilon u - \epsilon_{u_0} - \epsilon_a i_m - \epsilon_o \omega_m - \varphi_m \omega_m) - 3\lambda_{ex}(T_a + T_{cR})f_{exm}}{(1-f_R)(T'_c + T''_c q \varphi_m^{q-1}) + (2,25 + i'_a + i''_a q \varphi_m^{q-1})(T_a + T_{cR})} \right] \Delta t, \\
 \Delta i &= \left(\frac{2,25 + i'_a + i''_a q \varphi_m^{q-1}}{1-f_R} \right) \Delta \varphi + \frac{3\lambda_{ex}\Delta t}{1-f_R} f_{exm}, \\
 \Delta \omega &= (\epsilon_a i_m + \varphi_m i_m - \epsilon_m \omega_m - \epsilon_{mo}) \cdot \frac{\Delta t}{T_m}, \\
 \Delta f_{ex} &= -2,25 \cdot \Delta \varphi - 3\lambda_{ex} \Delta t \cdot f_{exm}, \\
 \Delta t &= 0,001 \dots 0,005 \text{ сек.}
 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Средние значения тока, потока, угловой скорости вращения и вихревых токов за время Δt будут:

$$\begin{aligned}
 i_m &= i + \frac{\Delta i}{2}; \quad \varphi_m = \varphi + \frac{\Delta \varphi}{2}; \\
 \omega_m &= \omega + \frac{\Delta \omega}{2}; \quad f_{exm} = f_{ex} + \frac{\Delta f_{ex}}{2}.
 \end{aligned}$$

Если 1) пренебречь влиянием вихревых токов в массивных частях, 2) заменить кривую намагничивания спрямленной характеристикой (рис. 1), 3) кривую нагрузочного момента также заменить прямой (рис. 2); наконец, пренебречь реакцией якоря, то в этом упрощенном случае целесообразнее воспользоваться методом последовательных интервалов.

Приращения тока Δi и угловой скорости $\Delta \omega$ будут определяться следующими выражениями:

$$\left. \begin{aligned}
 \Delta i &= \frac{2a_2(\epsilon u - \epsilon_{u_0}) - 2[a_2a_2 - \epsilon_{mo}(1-f_R)]i - 2(a_2 - \epsilon_m)(1-f_R)\omega i - 2(1-f_R)^2i^3}{D}, \\
 \Delta \omega &= \frac{-2a_1\epsilon_{mo} + 4(1-f_R)(\epsilon u - \epsilon_{u_0})i - 2[a_1\epsilon_m + \epsilon_{mo}(1-f_R)]\omega + 2(1-f_R)(a_1 - 2\epsilon_a)i^2}{D} - \\
 &\quad - \frac{2(1-f_R)^2i^2\omega + 2\epsilon_m(1-f_R)\omega^2}{D},
 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где

$$a_1 = \epsilon_a + \frac{2T_{ac}}{\Delta t}; \quad a_2 = \epsilon_m + \frac{2T_m}{\Delta t}. \quad (5a)$$

$$D \approx a_1 a_2. \quad (5b)$$

В этом случае значения тока и угловой скорости вращения определяются по уравнениям:

при $t_{k+1} = (k+1)\Delta t$; $i_{k+1} = i_k + \Delta i_{k+1}$; $\omega_{k+1} = \omega_k + \Delta \omega_{k+1}$;

при этом: $k = 0, 1, 2, 3$ и т. д.

При выводе (5) полагалось:

$$\left(i + \frac{\Delta i}{2} \right)^2 \approx i^2 + \frac{\Delta i}{2} 2i;$$

$$\left(i + \frac{\Delta i}{2} \right) \left(\omega + \frac{\Delta \omega}{2} \right) \approx \omega i + \frac{\Delta i}{2} \omega + \frac{\Delta \omega}{2} i.$$

Приближенное решение дает удовлетворительный результат только в случае расчета процессов маломощных двигателей.

Для приближенного случая установившиеся значения тока и угловой скорости вращения

электродвигателя η и ζ в долях номинальных значений будут:

$$\left. \begin{aligned}
 \text{ток} \quad \eta^3 + m\eta + n &= 0; \\
 \text{угловая скорость} \quad \zeta &= \frac{\epsilon u - \epsilon_{u_0} - \epsilon_a \eta}{(1-f_R)\eta}
 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

при этом

$$\begin{aligned}
 m &= -\frac{\epsilon_{mo}(1-f_R) - \epsilon_a \epsilon_m}{(1-f_R)^2}; \quad n = -\frac{\epsilon_m(\epsilon u - \epsilon_{u_0})}{(1-f_R)^2}; \\
 s &= \frac{n^2}{4} + \frac{m^3}{27} > 0,
 \end{aligned}$$

тогда

$$\eta = -\frac{\frac{m}{3} - \sqrt[3]{\left(\sqrt{s} - \frac{n}{2} \right)^2}}{\sqrt[3]{\sqrt{s} - \frac{n}{2}}}. \quad (6a)$$

При пуске в ход двигателя без нагрузки на валу $\epsilon_m = 0$, и установившийся ток холостого хода

$$\eta = \sqrt{\epsilon_{mo}}. \quad (6b)$$

ПРИЛОЖЕНИЕ

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА БЕЗРЕОСТАТНОГО ПУСКА ДВИГАТЕЛЯ С ОПЫТНЫМИ ДАННЫМИ

1. Двигатель 95 вт, 27 в, 5,8 а, 6000 об/мин

Пуск двигателя совершился без нагрузки на валу и установившаяся скорость вращения составляла 18500 об/мин (рис. 3). Данные двигателя следующие:

$$U = 27 \text{ в}; \quad E_n = c\Omega_n \Phi_a = 21,85 \text{ в}; \quad \Phi_a = 4,65 \cdot 10^{-4} \text{ мкв};$$

$$c = 0,745 \cdot 10^{-6};$$

$$\Omega_n = 628 \text{ 1/сек}; \quad r_a + r_c = 0,663 \text{ ом}; \quad L_a = 0,00413 \text{ гн};$$

$$F_R = 0;$$

$$M_{co} = 0,00109 \text{ кгм}; \quad A = 0; \quad GD^2 = 2,1 \cdot 10^{-4} \text{ кгм}^2;$$

$$\epsilon_{u_0} = 1 \text{ в};$$

$$\begin{aligned}
 b_{u_0} &= 0,3 \text{ в}; \quad a_c = 1,25 \cdot 10^{-4}; \quad \gamma_s = 0,8; \quad \lambda_s = 8; \quad 2p = 2; \\
 W_c &= 42.
 \end{aligned}$$

Параметры и постоянные времени по уравнениям (3а, 3г):

$$\epsilon_a = 0,19; \quad \epsilon = 1,23; \quad \epsilon_{u_1} = 0,0457; \quad \epsilon_{mo} = 0,053; \quad \epsilon_u = 0; \\ f_R = 0;$$

$$T_a = 0,001095 \text{ сек}; \quad T_c = 0,001965 \text{ сек};$$

$$T_{ac} = T_a + T_c = 0,00306 \text{ сек};$$

$$T_u = 0,164 \text{ сек}; \quad T_{cR} = 0.$$

Начальные значения тока и угловой скорости вращения в момент $t = 0$: $i(0) = a = 0$; $\omega(0) = \gamma = 0$; $u = 1$.

Далее, положив $\Delta t = 0,001$ сек, получаем по уравнениям (5а): $a_1 = 6,31$; $a_2 = 328$.

Тогда расчетные формулы для приращений тока и угловой скорости вращения по уравнениям (5) и (5б) принимают следующий вид в относительных единицах:

$$\left. \begin{aligned} \Delta i &= 0,375 - 0,06t - 0,317\omega t - 0,000965t^3; \\ \Delta\omega &= -0,000324 + 0,00229t - 0,0000512\omega + \\ &\quad + 0,00572t^2 - 0,000965t^2\omega. \end{aligned} \right\} (5')$$

Расчет по уравнениям (5') будет следующим:

$$1. t_1 = \Delta t = 0,001 \text{ сек};$$

$$\Delta i_1 = 0,375; \quad \Delta\omega_1 = -0,000324; \quad i_1 = 0 + \Delta i_1 = 0,375;$$

$$\omega_1 = 0 + \Delta\omega_1 = -0,000324.$$

$$2. t_2 = 2 \cdot \Delta t = 0,002 \text{ сек};$$

$$\Delta i_2 = 0,375 - 0,06 \cdot 0,375 + 0,317 \cdot 0,375 \cdot 0,000324 -$$

$$- 0,000965 \cdot 0,375^3 = 0,3525,$$

$$\Delta\omega_2 = -0,000324 + 0,00229 \cdot 0,375 - 0 + 0,00572 \cdot 0,375^2 - 0 = \\ = 0,000732;$$

$$i_2 = i_1 + \Delta i_2 = 0,375 + 0,3525 = 0,7275;$$

$$\omega_2 = \omega_1 + \Delta\omega_2 = -0,000324 + 0,000732 = 0,000408$$

и т. д.

По результатам этого расчета нарастание пускового тока до максимума происходит за время $t_m = 0,012$ сек; как и по опыту (рис. 3), максимум составляет $i_m = 2,66$, тогда как по опыту (рис. 3) $i_m = 2,85$, расчетное значение i_m менее опытного на 6,5%. Угловая скорость вращения якоря в момент максимума тока по расчету составляет $\omega = 0,261$.

2. Двигатель 1,7 квт, 220 в, 9,1 а, 1300 об/мин

Пуск двигателя совершился без нагрузки, при наличии на валу лишь массивного диска электромагнитного тормоза. Установившаяся скорость вращения составляла 2 050 об/мин (рис. 4). Данные двигателя следующие:

$$U = 220 \text{ в}; \quad E_n = c\Omega_n \Phi_a = 200 \text{ в}; \quad \Phi_a = 0,328 \cdot 10^6 \text{ мкс}; \\ c = 4,46 \cdot 10^{-6};$$

$$\Omega_n = 136 \text{ 1/сек}; \quad r_a + r_c = 2,45 \text{ ом}; \quad L_a = 0,0264 \text{ гн};$$

$$F_R = 400;$$

$$M_{co} = 0,39 \text{ кгм}; \quad A = 0; \quad GD^2 = 4 \text{ кгм}^2; \quad a_{u_1} = 2,1 \text{ в}; \\ b_{u_1} = 0,4 \text{ в};$$

$$a_c = 23,3 \cdot 10^{-6}; \quad b_c = 465 \cdot 10^{-30}; \quad q = 5; \quad \tau_s = 0,8;$$

$$\lambda_s = 22; \quad 2p = 4; \quad W_c = 90.$$

Параметры и постоянные времени по уравнениям (3а, 3г):

$$\epsilon_a = 0,113; \quad \epsilon_o = 0,02; \quad \epsilon = 1,125; \quad \epsilon_{u_1} = 0,01; \quad \epsilon_{mo} = 0,285;$$

$$\epsilon_u = 0; \quad f_R = 0,224; \quad i_a' = 0,840; \quad i_a'' = 0,189;$$

$$T_a = 0,0012 \text{ сек}; \quad T_c' = 0,00635 \text{ сек}; \quad T_c'' = 0,00010 \text{ сек};$$

$$T_{cR} = 0,0013 \text{ сек}; \quad T_u = 10,1 \text{ сек}; \quad \lambda_{ex} = 32,5 \text{ 1/сек}.$$

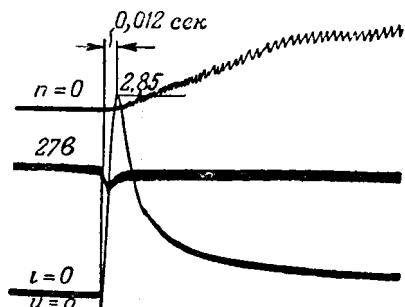


Рис. 3. Осциллограммы пуска электродвигателя 95 вт, 27 в.

Начальные значения тока, потока, угловой скорости вращения и н. с. вихревых токов в момент $t = 0$:

$$i(0) = a = 0; \quad \varphi(0) = \beta = 0; \quad \omega(0) = \gamma = 0; \quad f_{ex}(0) = 0; \\ u = 1.$$

Положив $\Delta t = 0,004$ сек, получаем по уравнениям (4) следующие расчетные формулы для приращений соответствующих величин в относительных единицах:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\varphi &= \\ &= \frac{0,336 - 0,0342i_m - 0,00605\omega_m - 0,303\varphi_m\omega_m - 0,046 \cdot f_{exm}}{0,891 + 0,164\varphi_m^4} \\ \Delta i &= (4,08 + 1,25\varphi_m^4) \cdot \Delta\varphi + 0,516f_{exm}, \\ \Delta\omega &= -0,000113 + 0,0000079i_m + 0,000396\varphi_m\omega_m, \\ \Delta f_{ex} &= -2,25 \cdot \Delta\varphi - 0,39f_{exm}. \end{aligned} \right\} (4')$$

Расчет по уравнениям (4') будет следующим:

$$1. t_1 = \Delta t = 0,004 \text{ сек};$$

первое приближение (полагаем: $i_{m1} = 0$; $\varphi_{m1} = 0$; $\omega_{m1} = 0$; $f_{exm1} = 0$):

$$\Delta\varphi_1' = \frac{0,336}{0,891} = 0,377,$$

$$\Delta i_1' = 4,08 \cdot 0,377 = 1,54,$$

$$\Delta\omega_1' = -0,000113,$$

$$\Delta f_{ex1}' = -2,25 \cdot 0,377 = -0,848.$$

Средние значения за первый промежуток времени $\Delta t = 0,004$ сек.

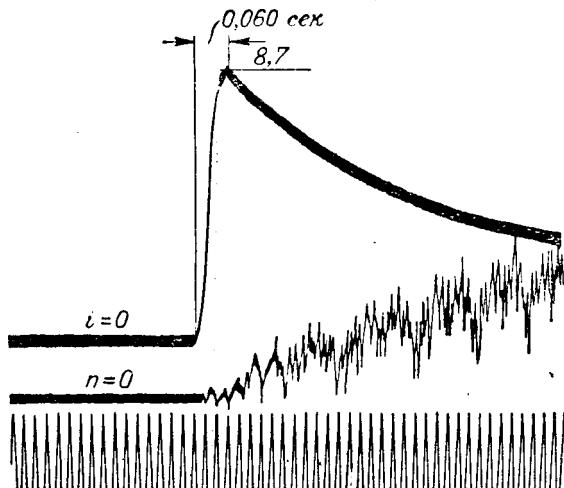


Рис. 4. Осциллограммы пуска электродвигателя 1,7 квт, 220 в.

По уравнениям (6a):

$$i'_{m1} = 0 + \frac{1,54}{2} = 0,77; \quad \varphi'_{m1} = 0 + \frac{0,377}{2} = 0,188;$$

$$\omega'_{m1} = 0 + \approx 0; \quad f'_{exm1} = 0 - \frac{0,848}{2} = -0,424;$$

второе приближение (подставляем в уравнения (4'): i'_{m1} , φ'_{m1} и т. д.):

$$\Delta\varphi_1 = \frac{0,336 - 0,0342 \cdot 0,77 - 0 - 0 + 0,046 \cdot 4,24}{0,891 + 0,164 \cdot 0,1884} = 0,370,$$

$$\Delta i_1 = (4,08 + 1,25 \cdot 0,1884) \cdot 0,370 - 0,516 \cdot 0,424 = 1,296,$$

$$\Delta\omega_1 = -0,000113 + 0,0000079 \cdot 0,77 + 0,000396 \cdot 0,188 \cdot 0,77 = -0,000018,$$

$$\Delta f_{ex1} = -2,25 \cdot 0,370 + 0,39 \cdot 0,424 = -0,668.$$

Приращения во втором приближении принимаем за окончательные; тогда значения тока, потока, угловой скорости и ампервитков вихревых токов в конце первого промежутка времени $t_1 = \Delta t$ будут:

$$i_1 = 0 + 1,296 = 1,296; \quad \varphi_1 = 0 + 0,370 = 0,370; \quad \omega_1 \approx 0;$$

$$f_{ex1} = 0 - 0,668 = -0,668;$$

2. $t_2 = 2\Delta t = 0,008$ сек:

первое приближение (полагаем: $i_{m2} = 1,296$; $\varphi_{m2} = 0,370$; $\omega_{m2} = 0$; $f_{exm2} = -0,668$):

$$\Delta\varphi_2 = \frac{0,336 - 0,0342 \cdot 1,296 - 0 - 0 + 0,046 \cdot -0,668}{0,891 + 0,164 \cdot 0,3704} = 0,361,$$

$$\Delta i_2 = (4,08 + 1,25 \cdot 0,3704) \cdot 0,361 - 0,516 \cdot -0,668 = 1,178,$$

$$\Delta\omega_2 = -0,000113 + 0,0000079 \cdot 1,296 + 0,000396 \cdot 0,370 \cdot 1,296 = 0,000087,$$

$$\Delta f_{ex2} = -2,25 \cdot 0,361 + 0,39 \cdot -0,668 = -0,550;$$

средние значения величин за второй промежуток времени $\Delta t = 0,004$ сек:

$$i'_{m2} = 1,296 + \frac{1,178}{2} = 1,885; \quad \varphi'_{m2} = 0,370 + \frac{0,361}{2} = 0,550;$$

$$\omega'_{m2} \approx 0; \quad f'_{exm2} = -0,668 - \frac{0,550}{2} = -0,943;$$

второе приближение (подставляем в уравнения (4'): i'_{m2} , φ'_{m2} и т. д.):

$$\Delta\varphi_2 = \frac{0,336 - 0,0342 \cdot 1,885 - 0 - 0 + 0,046 \cdot 0,943}{0,891 + 0,164 \cdot 0,5504} = 0,348,$$

$$\Delta i_2 = (4,08 + 1,25 \cdot 0,5504) \cdot 0,348 - 0,516 \cdot 0,943 = 0,973,$$

$$\Delta\omega_2 = -0,000113 + 0,0000079 \cdot 1,885 + 0,000396 \cdot 0,550 \cdot 1,885 = 0,000312,$$

$$\Delta f_{ex2} = -2,25 \cdot 0,348 = 0,39 \cdot 0,943 = -0,405.$$

Значения соответствующих величин к концу промежутка времени $t_2 = 2\Delta t$:

$$i_2 = 1,296 + 0,973 = 2,270; \quad \varphi_2 = 0,370 + 0,348 = 0,718;$$

$$\omega_2 = 0,000312; \quad f_{ex2} = -0,668 - 0,405 = -1,073.$$

Расчет продолжается тем же порядком до тех пор, пока не получают максимального значения пускового тока i_m .

По результатам этого расчета нарастание пускового тока до максимума происходит за время $t_m = 0,070$ сек, тогда как по опыту (рис. 4) $t_m = 0,060$ сек, превышение расчетного значения времени над опытным составляет 16%. Величина максимума составляет $i_m = 8,5$, тогда как по опыту (рис. 4) $i_m = 8,7$. Расчетное значение i_m менее опытного на 2%.

Выводы. Сравнение результатов расчета безреостатного пуска двух двигателей последовательного возбуждения с опытными данными показывает, что предлагаемая методика расчета по уравнениям (4) и (5) дает вполне удовлетворительные результаты.

Литература

1. Н. П. Ермолин. Переходные процессы в машинах постоянного тока. Госэнергоиздат, 1951.

[8.9.1952]



Аналитическое выражение регулировочной характеристики синхронной неявнополюсной машины

Кандидат техн. наук, доц. В. В. ЕНЬКО
Московский горный институт им. Сталина

Регулировочные характеристики насыщенных синхронных машин давно и хорошо известны и имеют широкое распространение при проектировании машин и расчетах режимов их работы. Поэтому, казалось бы, больше нечего о них и говорить. Однако еще никем не было показано, приближаются ли эти характеристики к каким-либо классическим кривым и насколько. Между тем решение этой задачи представляет определенный теоретический интерес. Кроме того, широкое применение регулировочных характеристик в практике делает ценным всякое предложение, упрощающее их расчет и сокращающее время такого расчета.

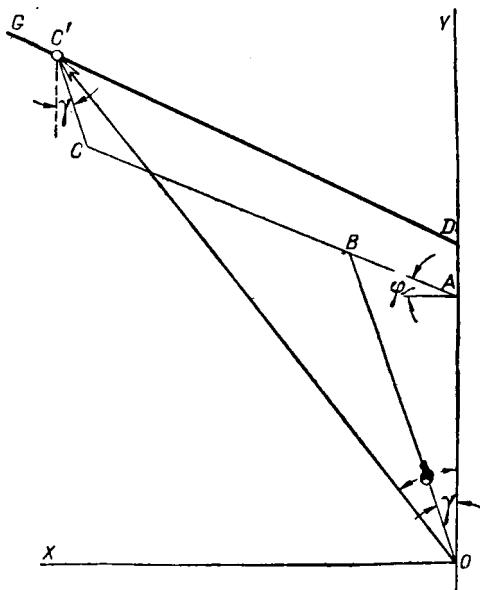


Рис. 1.

В настоящей работе дано приближенное аналитическое выражение регулировочной характеристики и показано, что она является гиперболой или прямой. Кроме того, предложен метод построения полной регулировочной характеристики по одной точке, соответствующей номинальному току нагрузки.

На основе аппроксимации кривой намагничивания получено аналитическое выражение регулировочной характеристики. Показано, что регулировочная характеристика при $\cos \varphi \neq 0$ близко совпадает с гиперболой, а при $\cos \varphi = 0$ — с прямой. Исследовано геометрическое место вектора намагничивающей силы возбуждения. Предложен метод определения регулировочной характеристики по одной точке, соответствующей номинальному току якоря.

На рис. 1 $OACC'D$ представляет обобщенную векторную диаграмму [Л. 1]¹ для генераторного режима. На рис. 1 обозначено:

$\overline{OA} = \dot{U}$ — напряжение на зажимах;

$\overline{AB} = jI x_s$ — падение напряжения в индуктивном сопротивлении рассеяния;

$\overline{OB} = \dot{E}$ — внутренняя э. д. с., соответствующая результирующему потоку в воздушном зазоре; в обобщенной диаграмме эта э. д. с. численно равна результирующей намагничивающей силе (н. с.) F' при отсутствии насыщения;

$\overline{CC'} = -j\Delta F$ — добавочная н. с., обусловленная насыщением;

$\overline{CB} = -j\dot{F}_a$ — н. с. реакции якоря;

$\overline{OC'} = -j\dot{F}_s$ — н. с. возбуждения при нагрузке;

$\overline{OD} = -j\dot{F}_o$ — н. с. возбуждения при холостом ходе.

Аналитическое выражение регулировочной характеристики. Координаты точки C' по рис. 1 будут:

$$X = IX_d \cos \varphi + \Delta F \sin \gamma, \quad (1)$$

$$Y = U + IX_d \sin \varphi + \Delta F \cos \gamma. \quad (2)$$

В вышеприведенных равенствах $\sin \gamma$ и $\cos \gamma$ являются функциями тока I :

$$\sin \gamma = \frac{b}{E}, \quad (3)$$

$$\cos \gamma = \frac{a}{E}; \quad (4)$$

здесь обозначено:

$$b = I x_s \cos \varphi, \quad (5)$$

$$a = U + I x_s \sin \varphi, \quad (6)$$

при этом

$$E = \sqrt{a^2 + b^2}. \quad (7)$$

Добавочная н. с. ΔF определяется характеристикой холостого хода и является функцией э. д. с. E .

¹ Обозначения [Л. 1] θ , $\dot{\theta}$ и x_s заменены в настоящей работе на F , θ и x_s соответственно.

Для практически приемлемого решения поставленных здесь задач необходимо выразить $\Delta F = f(E)$ аналитически в простой и удобной для последующих преобразований форме.

Учтем, что при $I=1$ э. д. с. E будет наибольшей при $\cos \varphi = 0$ ($\varphi > 0$), $E = U + Ix_s$; индуктивное сопротивление рассеяния x_s в среднем равно 0,15. Поэтому достаточно, чтобы аналитическая зависимость $\Delta F = f(E)$ была приемлемо точной до значений E примерно 1,15—1,20.

Этим условиям удовлетворяет степенная функция

$$\Delta F = k \cdot E^a. \quad (8)$$

При этом характеристика холостого хода $E = f(F)$ может быть выражена обратной функцией

$$F = E + kE^a. \quad (9)$$

На рис. 2 построена характеристика холостого хода A по (9) при $k = 0,2$ и $a = 5$. Для сравнения там же показана нормальная характеристика B .

Как видно, до $E = 1,20$ совпадение с нормальной характеристикой удовлетворительное.

Учитывая (9) и численные значения k и a , а также (3), (4) и (7), преобразуем (1) и (2):

$$X = Ix_d \cos \varphi + 0,2b(a^2 + b^2)^2, \quad (10)$$

$$Y = U + Ix_d \sin \varphi + 0,2a(a^2 + b^2)^2. \quad (11)$$

Раскрыв скобки в правых частях (10) и (11), произведя подстановку (5) и (6) и отбрасывая члены, содержащие x_s во второй степени и выше, получим:

$$X = I \cos \varphi (x_d + 0,2U^4x_s), \quad (12)$$

$$Y = U(1 + 0,2U^4) + I \sin \varphi (x_d + U^4x_s), \quad (13)$$

Намагничающая сила возбуждения F_b определяется по координатам точки C' :

$$F_b = \sqrt{X^2 + Y^2}. \quad (14)$$

Выражение (14) может быть преобразовано таким образом:

$$F_b^2 = AI^2 + BI + C. \quad (15)$$

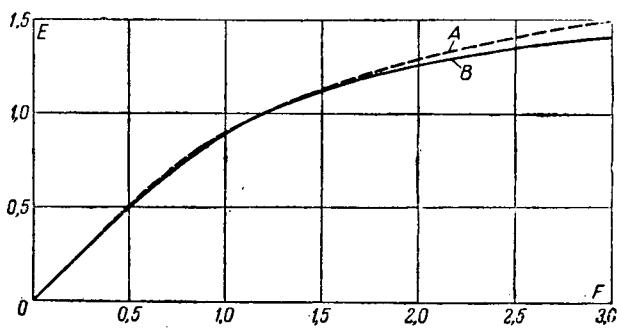


Рис. 2.

Коэффициенты уравнения (15) равны:

$$A = n^2 + q^2, \quad (16)$$

$$B = 2pq, \quad (17)$$

$$C = p^2. \quad (18)$$

Здесь обозначено:

$$n = \cos \varphi (x_d + 0,2U^4x_s), \quad (19)$$

$$p = U(1 + 0,2U^4), \quad (20)$$

$$q = \sin \varphi (x_d + U^4x_s). \quad (21)$$

Уравнение (15) приближенно выражает регулировочную характеристику $F_b = f(I)$, и, как показывает его рассмотрение, представляет частный случай общего уравнения второго порядка с двумя неизвестными.

Исследование коэффициентов этого уравнения показывает, что всегда $A > 0$ и $C > 0$, а коэффициент $B \leq 0$. Поэтому $B^2 - 4AC \geq 0$, а это означает, что (15) представляет гиперболу или две прямые. В последнем случае $B^2 = 4AC$.

Рассмотрим, когда это возможно. Учитывая (16), (17) и (18), условие $B^2 = 4AC$ перепишем так:

$$q^2 = n^2 + q^2. \quad (22)$$

Равенство (22) возможно при $n = 0$, что с учетом (19) означает $\cos \varphi = 0$. Следовательно, регулировочная кривая при $\cos \varphi = 0$ представляет прямую линию. Уравнение регулировочной характеристики для этого случая получится из (15), (16) и (18) подстановкой $n = 0$:

$$F_b = \sqrt{A \cdot I + C}. \quad (23)$$

Вышеизложенный анализ показывает, что регулировочная характеристика насыщенной синхронной неявнополюсной машиной при $\cos \varphi \neq 0$ представляет гиперболу, а при $\cos \varphi = 0$ — прямую. Более точное исследование показывает, что угловой коэффициент прямой при $\varphi > 0$ больше, чем при $\varphi < 0$. На рис. 3 приведено семейство гипербол, построенных по уравнению (15), коэффициенты которого вычислены по (16), (17), (18). Частичные ветви этих гипербол, лежащие в первом квадранте, приближенно представляют регулировочные характеристики турбогенератора, имеющего нормальную характеристику холостого хода и параметры $x_d = 1,65$ и $x_s = 0,15$.

Отметим еще некоторые детали. Решая (23) относительно I , получим зависимость $I = f(F_b)$, которая представляет U-образную характеристику синхронной машины при холостом ходе или характеристику синхронного компенсатора:

$$I = \frac{1}{\sqrt{A}} F_b - \sqrt{\frac{C}{A}}. \quad (24)$$

При $B = 0$ кривая $F_b = f(I)$, выражаемая уравнением (15), будет симметрична относительно оси ординат. Как видно из (17), это будет при

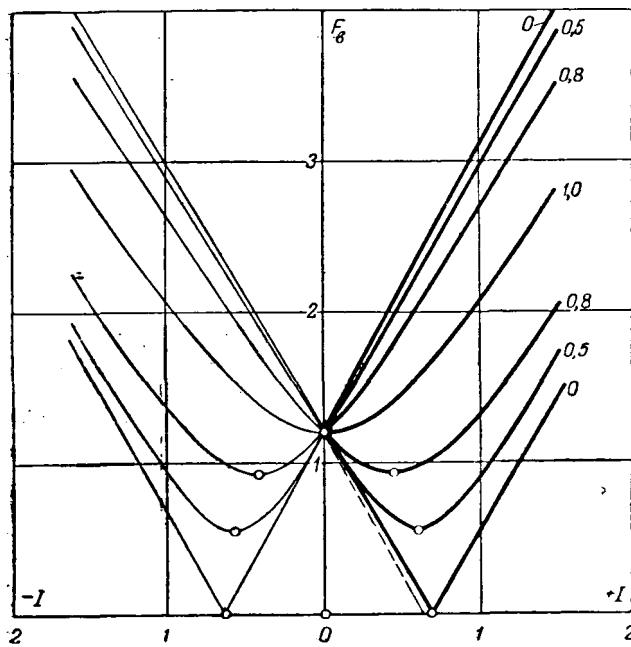


Рис. 3.

$\sin \varphi = 0$, т. е. $\cos \varphi = 1$. Более точный анализ показывает, что это будет при $\cos \varphi \approx 1$ ($\varphi < 0$). При активно-емкостной нагрузке н. с. возбуждения будет иметь минимум при некотором положительном значении тока I . Дифференцируя (15), получим:

$$\frac{dF_b}{dI} = \frac{2AI + B}{2F_b}. \quad (25)$$

Приравнивая (25) нулю, определим значение тока I , при котором возбуждение будет наименьшее:

$$I = -\frac{B}{2A}. \quad (26)$$

Геометрическое место вектора н. с. возбуждения. Равенства (1) и (2) совместно представляют уравнение геометрического места $GC'D$ вектора н. с. возбуждения, выраженное в параметрической форме с параметром I .

Для выяснения характера кривой этого геометрического места исследуем производную $\frac{dY}{dX}$:

$$\frac{dY}{dX} = \frac{\frac{dY}{dI}}{\frac{dX}{dI}} = \frac{x_d \sin \varphi + \frac{d}{dI}(\Delta F \sin \gamma)}{x_d \cos \varphi + \frac{d}{dI}(\Delta F \cos \gamma)}. \quad (27)$$

Полагая ту же аппроксимацию характеристики холостого хода, что и выше, и отбрасывая члены, содержащие x_σ в степени выше первой, получаем:

$$\frac{dY}{dX} = \text{пост.} \quad (28)$$

Следовательно, кривая $GC'D$, представляющая геометрическое место вектора н. с. возбуждения, может быть аппроксимирована прямой GD . При этом, как показывают приближенные выражения

(12) и (13), координаты точек этой прямой линейно зависят от тока I .

Метод ускоренного расчета регулировочных характеристик. Так как кривая $GC'D$ может быть аппроксимирована прямой GD , координаты точек которой линейно зависят от тока I , то для построения регулировочной характеристики при заданном $\cos \varphi$ достаточно ограничиться определением одной точки при номинальном токе I_n . Остальные точки характеристики при $I \neq I_n$ могут быть получены пропорциональным делением прямой GD как расстояния от центра O до соответствующих точек этой прямой. Проще и быстрее всего такой расчет производить графически. Однако он может быть выполнен и аналитически. Обозначим X_n, Y_n координаты точки C' рис. 1 при номинальном токе.

Непосредственно из рис. 1 получаем:

$$F_b^2 = (X_n I)^2 + [F_0 + (Y_n - F_0) I]^2. \quad (29)$$

Это уравнение позволяет приблизенно рассчитать регулировочную характеристику по одной точке X_n, Y_n .

Оно может быть легко преобразовано в форму (15). При этом коэффициенты A, B и C определяются следующим образом:

$$A = F_{b_n}^2 + F_0 (F_0 - 2Y_n) = F_{b_n}^2 - (B + C), \quad (30)$$

$$B = 2F_0 (Y_n - F_0), \quad (31)$$

$$C = F_0^2; \quad (32)$$

при этом по (14)

$$F_{b_n}^2 = X_n^2 + Y_n^2.$$

Табл. 1 показывает, насколько точен предлагаемый метод.

Коэффициенты A, B и C рассчитаны по (30), (31) и (32).

Расчеты произведены по нормальной характеристике для турбогенератора, имеющего параметры $x_d = 1,65$, $x_\sigma = 0,15$ и $\cos \varphi_n = 0,8$. Как видно из этой таблицы, при расчете предложенным методом получаются результаты, отличающиеся от точных в области до I_n , $\varphi > 0$ менее чем на 0,5% от F_{b_n} .

Ориентировочное определение возбуждения при нагрузке. Этой цели могут служить приближенные выражения (12) и (13). Для иллюстрации того, насколько эти выражения пригодны для ориентировочных подсчетов, в табл. 2 сделано сопоставление для $x_d = 1,65$, $x_\sigma = 0,15$.

Методическое значение исследования. В курсах электрических машин угловые и U-образные характеристики увязываются с соответствующими геометрическими местами, определяемыми по диаграмме неявнополюсной ненасыщенной машины.

Таблица 1

I	F_B	$\varphi > 0$			$\varphi < 0$		
		0	0,5	0,8	1	0,8	0,5
0	точно	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200
	по (15)	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200
0,25	точно	1,653	1,608	1,509	1,272	0,989	0,838
	по (15)	1,671	1,619	1,518	1,272	0,991	0,844
0,50	точно	2,116	2,034	1,876	1,465	0,944	0,600
	по (15)	2,140	2,054	1,887	1,465	0,940	0,604
0,75	точно	2,591	2,488	2,264	1,744	1,080	0,628
	по (15)	2,610	2,495	2,280	1,744	1,069	0,626
1,00	точно	3,081	2,944	2,684	2,070	1,327	0,901
	по (15)	3,081	2,944	2,684	2,070	1,327	0,901
1,25	точно	3,583	3,427	3,115	2,429	1,674	1,279
	по (15)	3,552	3,391	3,105	2,429	1,655	1,260
1,50	точно	4,108	3,918	3,558	2,805	2,037	1,644
	по (15)	4,020	3,846	3,522	2,805	2,017	1,660

Таблица 2

U	$\cos \varphi$	F_B	
		точно	по (12) и (13)
1,00	1,00	2,07	2,06
1,00	0,80	2,68	2,65
1,00	0,00	3,08	3,00
1,05	0,80	2,81	2,85

Это, несомненно, повышает наглядность и усвоемость данных разделов. При изложении регулировочной характеристики такую связку почему-то не применяют. Автор считает это упущением. Следует увязать регулировочную характеристику с геометрическим местом вектора намагничивающей силы возбуждения. Это не представит никакого труда. Как показывает вышеупомянутое исследование, в насыщенной машине это геометрическое место мало отличается от прямой, а в ненасыщенной, как известно, точно представляет прямую. Отсюда вытекает, между прочим, что как в ненасыщенной, так и в насыщенной машине кривые $F_B = f(I)$ представляют собой гиперболы, взаимно смещенные и несколько отличающиеся по форме. Понятно из предыдущего, что для насыщенной машины гипербола является лишь хорошей аппроксимацией действительной характеристики.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Расчет регулировочной характеристики при $\cos \varphi = 0,8$ и $U = U_n = 1$ для турбогенератора, имеющего нормальную кривую намагничивания и параметры $x_d = 1,65$ и $x_a = 0,15$.

Прежде всего определяют возбуждение при номинальном токе $I = I_n = 1$ по (5), (6) и (7):

$$b = 0,15 \cdot 0,8 = 0,12,$$

$$a = 1 + 0,15 \cdot 0,6 = 1,09,$$

$$E = \sqrt{1,09^2 + 0,12^2} = 1,097.$$

Для определения ΔF можно воспользоваться весьма точной формулой [Л. 2]

$$\Delta F = 0,0012e^{5,12E} = 0,0012e^{5,12 \cdot 1,097} = 0,328. \quad (33)$$

По (1), (2), (3) и (4)

$$X_n = 1,65 \cdot 0,8 + \frac{0,328 \cdot 0,12}{1,097} = 1,356,$$

$$Y_n = 1 + 1,65 \cdot 0,6 + \frac{0,328 \cdot 1,09}{1,097} = 2,316,$$

по (14)

$$F_{an} = \sqrt{1,356^2 + 2,316^2} = 2,684.$$

Возбуждение при других значениях тока определяют или графически, что проще всего, или аналитически.

Для графического расчета наносят в прямоугольной системе координат точку C' по вычисляемым ее координатам X_n и Y_n и точку D из условия

$$OD = F_o.$$

Для нормальной характеристики $F_o = 1,2$. Соединяют точки C' и D прямой и делят $\overline{C'D}$, например, на 4 части, соответственно 0,25; 0,50; 0,75 от I_n .

Наконец, измеряют расстояние от начала координат до точек деления и получают соответствующие значения намагничающей силы возбуждения F_b . Для $I > I_n$ откладывают соответствующий отрезок влево от точки C' на продолжении прямой $\overline{C'D}$.

Для аналитического расчета применяют непосредственно (29) или вычисляют коэффициенты по (30), (31), (32) и применяют (15). Оба эти варианта тождественны.

Например, задано $I = 0,5$. По (29)

$$F_b = \sqrt{(1,356 \cdot 0,5)^2 + [1,2 + (2,316 - 1,2) \cdot 0,5]^2} = 1,876$$

или по (30), (31) и (32)

$$C = 1,2^2 = 1,440,$$

$$B = 2 \cdot 1,2 (2,136 - 1,2) = 2,680,$$

$$A = 2,684^2 - (2,680 + 1,440) = 3,086$$

и затем по (15)

$$F_b = \sqrt{3,086 \cdot 0,5^2 + 2,680 \cdot 0,5 + 1,440} = 1,876.$$

Теперь аналогично предыдущему рассчитывают возбуждение для других значений I и определяют полную регулировочную характеристику.

Литература

1. В. В. Енько. Обобщенная векторная диаграмма синхронной неявнополюсной машины и ее применение. Электричество, стр. 48, № 4, 1951.

2. В. В. Енько. Аналитическое выражение нормальной характеристики холостого хода. Электричество, стр. 28, № 10, 1951.

[13. 6. 1952]



Получение высоких напряжений при помощи резонансных трансформаторов

Доктор техн. наук Г. И. БАБАТ

Москва

Введение. В конце прошлого века Никола Тесла [Л. 1] предложил применять для получения высоких напряжений так называемые резонансные трансформаторы, т. е. такие, у которых вторичная обмотка является колебательным контуром, возбуждаемым на собственной частоте колебаний. Трансформаторы Тесла работали с затухающими колебаниями. Первичная их обмотка возбуждалась искровым разрядом. Частота собственных колебаний в описанных конструкциях была в пределах от десятков тысяч до нескольких миллионов герц; число искровых разрядов через первичную обмотку (серий затухающих колебаний) было от нескольких десятков до сотен в секунду.

Трансформаторы Тесла и поныне являются одним из широко распространенных демонстрационных приборов в средней и высшей школах. Кроме того, в настоящее время трансформаторы Тесла малой мощности применяются в лабораториях и в электровакуумной промышленности для обнаружения и отыскания течей в электровакуумных приборах и вакуумных схемах.

В годы первой мировой войны появились в промышленной практике резонансные трансформаторы на частоты от нескольких десятков до тысяч герц и на мощность от единиц до десятков киловатт. Эти трансформаторы строились со стальными сердечниками и работали с незатухающими колебаниями. Они применялись для питания искровых радиопередатчиков от машинных генераторов. Элементарная теория подобных трансформаторов была изложена в ряде курсов, например в [Л. 2]. В связи с появлением элек-

тронных ламп искровые передатчики перестали применяться, а с ними вышли из употребления и низкочастотные резонансные трансформаторы питания.

После первой мировой войны в связи с развитием исследований в области атомной физики были сделаны попытки применить резонансные трансформаторы в ускорителях заряженных частиц (электронов и ионов). Можно здесь указать на работы Л. В. Мысовского в СССР [Л. 3], а также на некоторые зарубежные исследования [Л. 4].

В тридцатых годах в радиотехнике стали практически применяться колебательные контуры так называемого полого типа (эндовибраторы), представляющие собой объем, ограниченный оболочкой из высокоелектропроводного материала (чаще всего меди). Резонансные трансформаторы с полыми контурами используются для разнообразных целей: радиоприемные и передающие устройства, локационные установки, измерительная аппаратура, ускорители заряженных частиц, преимущественно для частот выше 10 мгц (волны не длиннее 30 м).

Настоящая работа посвящена резонансным трансформаторам катушечного типа. Их область частот ниже 10 мгц.

Известно несколько конструкций рентгеновских аппаратов с катушечными резонансными трансформаторами [Л. 5]. Возможно их применение в различных высоковольтных испытатель-

¹ По сравнению с трансформаторами полого типа катушечные трансформаторы являются "низкочастотными".

ных установках на напряжения до нескольких миллионов вольт. Есть предложения применять катушечные резонансные трансформаторы для зажигания высоковольтных вентилей.

В отечественной и зарубежной литературе опубликовано множество работ, посвященных воздействию электронов высоких скоростей на различные материалы, в частности на пищевые продукты, антибиотики и т. д. Ускоренные напряжением в 1 млн. в электрона проходят, например, в воде чуть около 5 мм, а при более высоких напряжениях — при 5 млн. в — до 30 мм. В материалах, пронизанных достаточно мощным электронным потоком, уничтожается всякая жизнедеятельность, они становятся совершенно стерильными. По литературным данным для электронной стерилизации необходимо значительно меньше энергии, чем при термической стерилизации.

Начиная с 1927 г., автор спроектировал и построил ряд резонансных трансформаторов разных типов на напряжения от нескольких тысяч вольт до сотен киловольт для различных целей.

На базе этого опыта ниже излагаются некоторые теоретические положения, лежащие в основе выбора конструкции и режимов работы резонансных трансформаторов.

Схемы включения и конструкция резонансного катушечного трансформатора. На рис. 1 показана принципиальная схема резонансного трансформатора, питающего многосекционную электронную трубку. Ток от сети частоты 50 гц выпрямляется и подается в ламповый генератор.

В анодную цепь генератора включена первичная обмотка резонансного трансформатора. Возможно также питать резонансный трансформатор и без специального генератора непосредственно от сети 50 гц или через умножитель частоты. Возможны также иные, чем показанный на рис. 1, методы связи цепи питания с высоковольтной резонансной обмоткой — автотрансформаторное включение, емкостная связь.

На рис. 2 показаны схемы конструктивного оформления вторичной высоковольтной обмотки резонансного трансформатора. Как будет видно

из дальнейших расчетов, резонансный трансформатор, предназначенный для получения высоких напряжений, в большинстве случаев выгодно выполнять «несимметричным», т. е. не делить поровну проводниковый материал (алюминий, медь) между первичной и вторичной обмотками; основное количество проводникового материала, затрачиваемого в трансформаторе, должно быть помещено во вторичной высоковольтной обмотке.

Можно различить два основных типа конструкции высоковольтной обмотки резонансного трансформатора: четвертьвольновой тип и полуволновой. У четвертьвольнового заземлен один из концов.

На этом конце колебательный ток имеет максимальное значение (пучность волны тока). Второй тип обмотки — полуволновой; в нем заземлена средняя точка обмотки, а оба конца обмотки находятся под высоким напряжением относительно земли. В полуволновой конструкции пучность тока находится в средней части обмотки, а минимальное значение ток имеет на ее обоих концах.

Высоковольтная обмотка резонансного трансформатора выполняется в виде катушки, концы которой закруглены для того, чтобы обеспечить минимальный градиент напряжения у поверхности обмотки. Закругления могут быть выполнены в виде витков все уменьшающегося диаметра.

Если резонансный трансформатор служит для питания трубки, ускоряющей электроны или ионы, то эта трубка располагается по оси высоковольтной обмотки. Катод и анод трубы соединяются с концами обмотки, а промежуточные секции трубы подключаются к точкам обмотки с соответствующим напряжением.

Диаметр высоковольтной обмотки обычно значительно больше диаметра ускорительной трубы. При вычислении электрических параметров трансформатора, как то: индуктивности, активного сопротивления, резонансной частоты, можно не принимать в расчет наличие ускорительной трубы.

В первых резонансных трансформаторах, которые строились еще самим Никола Тесла, высоковольтная обмотка выполнялась в виде однослоиного соленоида с высотой h , в несколько раз большей, чем диаметр d . При $h \gg d$ напряженность электрического поля вдоль оси обмотки

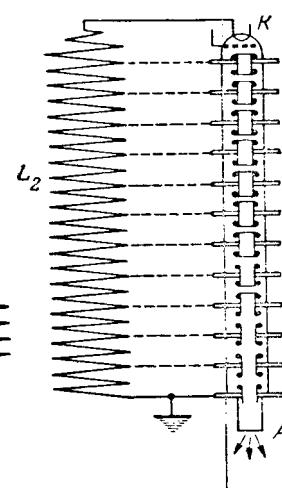


Рис. 1. Принципиальная схема ускорителя электронов с катушечным резонансным трансформатором.

T_1 — анодный трансформатор; L — выпрямитель; L_1 и L_2 — генераторные лампы; L_1 — первичная обмотка резонансного трансформатора; L_2 — вторичная высоковольтная обмотка; K и A — катод и анод многосекционной ускорительной трубы.

$E_{a_{kc}} \approx \frac{U}{h}$ в несколько раз меньше радиальной составляющей электрического поля у поверхности обмотки $E_{rad} \approx \frac{2U}{d}$. Подобные конструкции иногда можно встретить и в настоящее время. В литературе описаны ускорительные трубы с резонансными трансформаторами таких пропорций. В этих трансформаторах основой высоковольтной резонансной обмотки служит труба или призма из изоляционного материала. При этом допустимое значение $E_{a_{kc}}$ определяется из условия возникновения скользящего разряда между витками обмотки вдоль поверхности изоляционного каркаса. Допустимое значение E_{rad} определяется из условия возникновения короны. Скользящий разряд по поверхности твердого изолятора в воздухе при нормальном давлении образуется при градиентах, в несколько раз меньших, чем коронный разряд. Поэтому для обеспечения электрической прочности конструкции высота h высоковольтной обмотки выбиралась значительно больше ее диаметра.

Однако, как будет видно из дальнейших расчетов, при уменьшении отношения h/d обмотки возрастает ее резонансное сопротивление, уменьшаются потери в проводниках обмотки при заданном напряжении на ней U .

Кроме того, в обмотку в виде однослойного соленоида можно уместить лишь сравнительно ограниченное количество проводникового материала, трансформатор получается «бедный медью». Между тем при правильной конструкции трансформатора его резонансное сопротивление Z_r растет с увеличением веса проводникового материала в обмотке. Поэтому целесообразно выполнять высоковольтную резонансную обмотку не в виде однослойного соленоида, а из ряда секций в виде плоских спиралей каждая, соединяемых последовательно одна с другой, как это показано на рис. 2. Витки секций могут укрепляться на планках из дерева, пластмассы, керамики или другого изоляционного материала так, чтобы расстояние для скользящего разряда было всюду достаточно велико. Радиальный размер обмотки Δ может быть порядка одной трети от внешнего радиуса обмотки.

Ось высоковольтной резонансной обмотки может располагаться как вертикально, так и горизонтально.

В литературе опубликованы конструкции резонансных трансформаторов, обмотки которых помещены в бак с маслом. Мы считаем такие конструкции нерациональными. В резонансных трансформаторах, как будет показано в дальнейшем, велика реактивная мощность. Высоковольтная обмотка должна иметь малый декремент затухания $\delta = R_n/\omega L$ (высокую добротность Q). Сопротивление потерь R_n состоит из суммы сопротив-

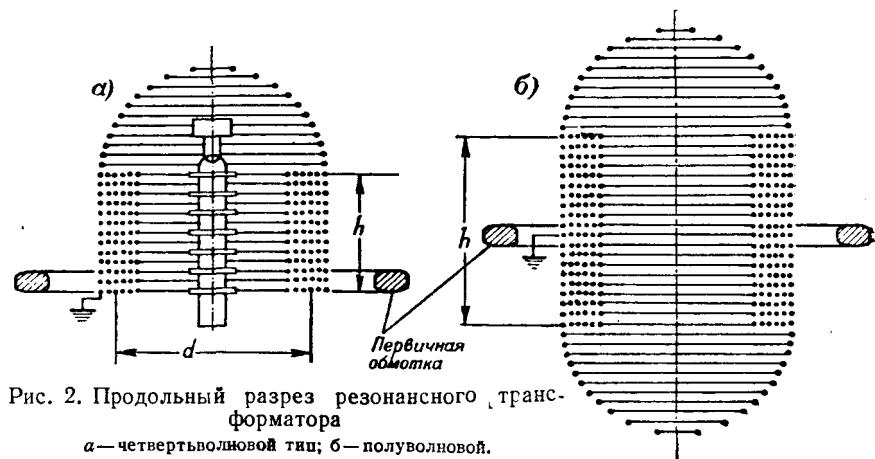


Рис. 2. Продольный разрез резонансного трансформатора

ления потерь в проводниках R_2 и сопротивления потерь в электрическом поле обмотки R_s . Применяя жидкие и твердые диэлектрики, трудно получить малые потери в электрическом поле.

Можно поместить резонансный трансформатор в бак, внутри которого создается повышенное давление: сжатый воздух, азот или специальный газ с повышенной электрической прочностью, например шестифтористая сера — так называемый элегаз или, наоборот, — высокий вакуум.

Количество твердых диэлектриков в конструкции резонансных трансформаторов должно быть минимальным.

В резонансных трансформаторах вакуумного или пневматического типа мощный быстропеременный магнитный поток вторичной обмотки замыкается в зазоре между катушкой и металлическим кожухом. Этот зазор нельзя делать поэтому малым. Повидимому, целесообразное отношение внешнего диаметра обмотки и внутреннего диаметра кожуха 1 : 3. Это отношение соответствует также условию максимальной электрической прочности конструкции при заданных ее внешних габаритах. Если кожух стальной, то может оказаться целесообразным экранировать его изнутри алюминием или медью, чтобы повысить добротность обмоток трансформатора, уменьшив потери от наведенных в кожухе вихревых токов.

Когда резонансный трансформатор служит для питания ускорительной электронной трубы с заземленным анодом, то накал катода трубы может быть осуществлен от вспомогательного резонансного контура основной частоты или другой, более высокой частоты.

Для управления электронным потоком (отпирания и запирания его) у катодного конца трубы должна быть помещена соответствующая электронная схема. Она может управляться на частоте в несколько раз более высокой, чем основная рабочая частота резонансной обмотки. Импульсы управления вводятся в резонансную обмотку у ее заземленной части и выделяются затем у высоковольтного конца резонансной обмотки при помощи соответствующего колебательного контура.

Основные соотношения. Примем следующие обозначения: высота высоковольтной обмотки h ,

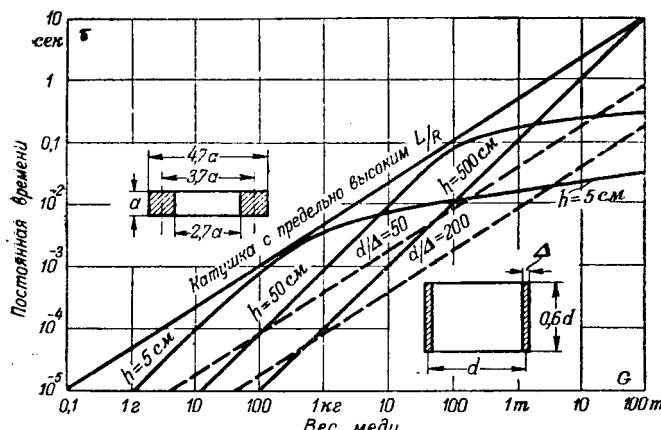


Рис. 3. Постоянная времени медных катушек различных пропорций в зависимости от их веса.

Ограничивающая (верхняя) линия относится к максвелловской катушке, пропорции которой представлены на верхнем эскизе. Пунктирные линии относятся к катушкам с пропорциями, представленными на нижнем эскизе. Остальные кривые даны для трех катушек постоянной высоты (переменные d и Δ).

средний ее диаметр d , радиальная толщина обмотки Δ , число витков n , полная длина проводника высоковольтной обмотки $l = \pi d n$, вес проводникового материала в обмотке G , удельное электросопротивление и удельный вес ρ и γ , сечение проводника обмотки q .

Будем считать, что переменный ток равномерно распределен по всему сечению проводников обмотки. Активное сопротивление проводника обмотки

$$R_2 = \frac{\rho l^2}{G} \text{ [ом].} \quad (1)$$

Индуктивность высоковольтной обмотки

$$L_2 = k 4 \pi \frac{\pi d^2}{4h} n^2 \cdot 10^{-9} = k \frac{l^2}{h} \cdot 10^{-9} \text{ [гн],} \quad (2)$$

k — поправочный множитель, величина которого зависит от соотношения размеров обмотки: h , d и Δ .

Поделив формулу (2) на формулу (1), получим так называемую постоянную времени высоковольтной резонансной обмотки:

$$\frac{L_2}{R_2} = \frac{kG}{\gamma \rho h} \cdot 10^{-9} \text{ [сек].} \quad (3)$$

Отношение L/R катушки не зависит от числа витков в ней, а определяется ее конструктивными пропорциями и весом G проводника в ней. В качестве эталона для сравнения всевозможных конструкций возьмем так называемую „максвелловскую катушку“ (рис. 3), пропорции которой таковы, что она имеет максимально возможное отношение L/R при данной затрате проводникового материала [Л. 6]. Сечение обмотки максвелловской катушки имеет форму квадрата. Обозначим сторону его a . Средний диаметр катушки в 3,7 раза больше стороны этого квадрата. Если обозначить коэффициент заполнения сечения обмотки медью через $\sigma = \frac{pq}{a^2}$ и вес катушки выражать в граммах, то для

максвелловской катушки получим:

$$\begin{aligned} R &= \frac{10^{-4}}{G^{1/3} \sigma^{2/3}} n^2 \text{ [ом],} \\ L &= 4 \left(\frac{G}{\sigma} \right)^{1/3} n^2 \cdot 10^{-9} \text{ [гн],} \\ \frac{L}{R} &= 10^{-3} a^2 \sigma \text{ [сек],} \\ \frac{L}{R} &= 5,7 \cdot 10^{-5} \cdot G^{2/3} \sigma^{1/3} \text{ [сек].} \end{aligned} \quad (4)$$

На рис. 3 представлена зависимость постоянной времени $\frac{L}{R}$ от веса меди для катушек различных пропорций при $\sigma = 1$.

Зная постоянную времени катушки, можно вычислить ее резонансное сопротивление Z_p . Эта величина определяет потребляемую резонансной обмоткой на холостом ходу мощность $P_2 = U^2/Z_p$. Резонансное сопротивление можно определить по формуле

$$Z_p = \frac{L_2}{R_2 \cdot C} = \frac{L_2}{R_2} L_2 \omega^2,$$

C — собственная емкость катушки плюс емкость ускорительной трубы или другой присоединенной к катушке аппаратуры. С этой емкостью обмотка образует резонансный контур с частотой ω . Резонансная длина волны катушки $\lambda = \frac{2\pi c}{\omega}$, где c — скорость света ($3 \cdot 10^{10}$ см/сек).

Произведение $L \omega^2$ можно представить в таком виде:

$$\left(\frac{l}{\lambda} \right)^2 \frac{k}{h} \cdot 4\pi^2 \cdot 9 \cdot 10^{11}.$$

Помножив эту величину на постоянную времени и подставив для удельного веса γ и удельного электросопротивления ρ соответствующие значения для меди, получим:

$$Z_p = \left(\frac{l}{\lambda} \right)^2 \frac{k^2}{h^2} G \cdot 2 \cdot 10^9 \text{ [ом].} \quad (5)$$

В этой формуле вес меди выражен в граммах, высота обмотки в сантиметрах. Поправочный множитель k зависит, как уже указывалось, от соотношения конструктивных размеров. Чем меньше h/d , тем меньше и k . При $h \gg d > \Delta$ $k = 1$.

Для максвелловской катушки

$$Z_p = 10^9 \cdot \left(\frac{l}{\lambda} \right)^2 \cdot G^{1/3} \cdot \sigma^{2/3} \text{ [ом]} \quad (6)$$

или

$$Z_p = 5 \cdot 10^9 \cdot \left(\frac{l}{\lambda} \right)^2 a \cdot \sigma \text{ [ом].} \quad (6a)$$

Отношение длины обмотки l к длине электромагнитной волны λ зависит от соотношения конструктивных размеров обмотки (h , d , Δ , σ), а также от схемы включения трансформатора. Если заземлена средняя точка высоковольтной обмотки, а оба ее конца находятся под высоким напряжением, то вдоль проводника обмотки может уложиться предельно половина длины электромагнитной волны. Практически в такой „полуволновой“ конструкции укладывается меньшая часть волны — одна треть, одна пятая. В обмотке „четвертьволнового“ типа

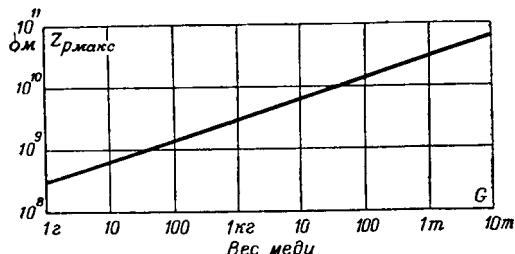


Рис. 4. Предельное резонансное сопротивление полуволновой максвелловской катушки в зависимости от веса меди.

укладывается еще меньше — одна шестая, одна десятая волны. Предельно высокое значение резонансного сопротивления может иметь полуволновая обмотка ($l/\lambda = 0,5$)

$$Z_p = 0,5 \cdot 10^9 \cdot \frac{k^2}{h^2} G \text{ [ом].} \quad (7)$$

Для максвелловской катушки при коэффициенте заполнения $\sigma = 1$ предельное значение резонансного сопротивления

$$Z_{p\max} = 1,3 \cdot 10^9 \cdot a = 3 \cdot 10^8 \cdot G^{1/3} \text{ [ом].} \quad (8)$$

Необходимо подчеркнуть, что никакой колебательный контур, выполненный из меди, не может иметь резонансное сопротивление, большее, чем дается формулой (8). Выполненные колебательные контуры любого типа имеют значительно меньшее резонансное сопротивление. На рис. 4 дан график предельного резонансного сопротивления в зависимости от веса меди в катушке.

Важно отметить, что непосредственно от длины волны, от частоты тока резонансное сопротивление катушки не зависит. Если при неизменном весе проводникового материала в обмотке и неизменных ее габаритах менять длину проводника, то резонансное сопротивление будет оставаться неизменным, а будет изменяться отношение колебательной мощности обмотки к потерям в ней. Это отношение будет возрастать прямо пропорционально частоте, т. е. обратно пропорционально длине проводника (или числу витков) резонансной обмотки. Отношение колебательной мощности к потерям равно произведению постоянной времени $\frac{L}{R}$ на ω .

Из формулы (4) следует, что для максвелловской катушки

$$\frac{L\omega}{R} = 3,6 \cdot 10^{-5} G^{2/3} \sigma^{1/3} f. \quad (9)$$

Для катушек, у которых высота превышает диаметр, из формулы (3) следует:

$$\frac{L}{R} = 5 \cdot 10^{-5} \frac{G}{h} \text{ и } \frac{L\omega}{R} = 3 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{G}{h} f. \quad (10)$$

Зная резонансное сопротивление, можно определить мощность P_2 , которую необходимо затратить в резонансной обмотке на холостом ходу, чтобы получить на ней напряжение $U = \sqrt{PZ_p}$.

Для максвелловской катушки

$$U = 3 \cdot 10^4 \frac{l}{\lambda} G^{1/3} \sigma^{1/3} \cdot P^{1/2} [\text{в}]. \quad (11)$$

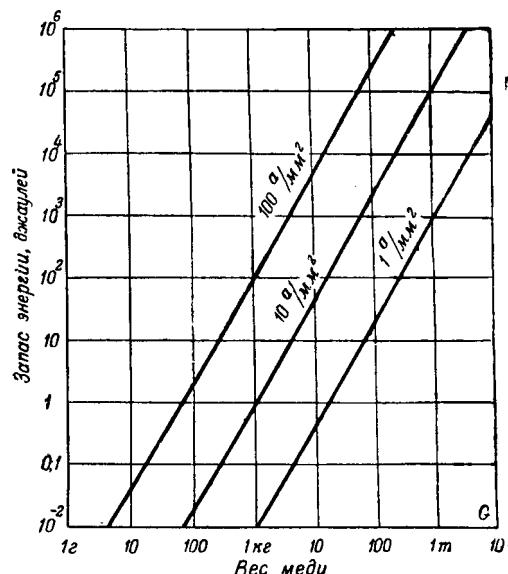


Рис. 5. Запас энергии в максвелловской катушке в зависимости от веса меди при разных плотностях тока.

В предельном случае при $\frac{l}{\lambda} = 0,5$ и $\sigma = 1$

$$U = 1,7 \cdot 10^4 \cdot G^{1/6} P^{1/2} [\text{в}]. \quad (12)$$

Реальные резонансные контуры всегда будут давать напряжение, более низкое, чем это следует по формуле (12). Если в резонансной обмотке $h > d$, то предельное развиваемое на ней напряжение

$$U = \frac{l}{\lambda} \cdot \frac{\sqrt{P \cdot G}}{h} \cdot 5 \cdot 10^4 [\text{в}]. \quad (13)$$

В этой формуле, как и во всех предыдущих, высота катушки h дана в сантиметрах, вес меди G в граммах, мощность P в ваттах.

В некоторых случаях интересно знать энергию, запасаемую в электромагнитном поле катушки. Обозначим допустимую плотность тока в обмотках катушки i [а/мм²], тогда $W = \frac{L(i\dot{q})^2}{2}$. На основании формулы (4) для максвелловских катушек

$$W = 10^{-4} a^5 i^2 = 10^{-7} G^{5/3} i^2 [\text{дж}]. \quad (14)$$

На рис. 5 приведен график максимальной возможной энергии, запасаемой в катушке без сердечника.

Литература

1. Nicola Tesla. Experiments with Alternating Currents of High Potential and High Frequency, N. Y., 1900.
2. И. Г. Фрейман. Основы радиотехники. Госиздат, 1928.
3. Л. В. Мысовский и В. Г. Рукавишников. Ускорение положительных и отрицательных ионов полем переменного тока высокой частоты. Докл. Росс. Академии наук, серия А, т. 53, 1922.
4. А. К. Вальтер. Атака атомного ядра. Техтеоретиздат, 1933.
5. А. П. Гринберг. Методы ускорения заряженных частиц. Техтеоретиздат, 1950.
6. Дж. К. Максвелл. Трактат об электричестве и магнетизме, т. 2, § 705.

Некоторые вопросы динамики электрогидроприводов

Профессор М. Г. ЧИЛИКИН
и кандидат техн. наук А. М. КОРЫТИН

Москва

Введение. Вопрос о динамических свойствах электрогидросистем играет существенную роль при сравнении этого типа привода с электрическим. Широкое внедрение рассматриваемых типов приводов для металлорежущих станков объясняется их конкурентоспособностью с электрическими для ряда исполнительных механизмов. Разработка методики построения механических характеристик электрогидропривода [Л.1] позволяет подойти к исследованию вопросов переходных процессов с позиций классической теории электропривода. Тем самым решается вопрос сравнения динамических свойств электрического и электрогидравлического типов привода.

Уравнение установившегося движения гидросистемы. Начнем рассмотрение с систем, в которых применен поршневой неротационный гидродвигатель. Установившееся движение характеризуется следующим уравнением:

$$p + \gamma \frac{V_{\infty}^2}{2g} = p_{\partial} + \gamma \frac{V_{\partial}^2}{2g} + \Delta p, \quad (1)$$

где p и p_{∂} — давление в полости нагнетания гидронасоса и давление гидродвигателя;

V_{∞} и V_{∂} — скорости рабочей жидкости и гидродвигателя;

γ — удельный вес жидкости.

Вторые члены обеих частей уравнения характеризуют инерционные напоры, Δp — потери давления в трассе.

Утечками в поршневых неротационных гидродвигателях можно пренебречь по сравнению с утечками в гидронасосе, следовательно, скорости рабочей жидкости и гидродвигателя можно выразить через производительность гидронасоса Q_T :

$$V_{\infty} = \frac{4}{\pi d^2} Q_T (1 - s'_{np}) \quad [м/мин], \quad (2)$$

где d — диаметр трубопровода,

s'_{np} — удельное скольжение гидронасоса;

$$V_{\partial} = \frac{Q (1 - s'_{np})}{k_v}, \quad (3)$$

В форме, известной в теории электропривода, приводится уравнение движения электрогидропривода. Предлагаются формулы для определения инерционных масс гидросистем. Исследуется вопрос быстродействия рассматриваемого типа привода.

где k_v — коэффициент пропорциональности между скоростью гидродвигателя и расходом рабочей жидкости.

Из последних двух уравнений нетрудно установить связь между скоростями жидкости и гидродвигателя. Потери давления в трассе могут быть определены, как произведение эквивалентного сопротивления трассы, приведенной к диаметру d , на расход рабочей жидкости. После соответствующих подстановок

$$p + \frac{\gamma}{2g} \cdot \frac{16k_v^2}{\pi^2 d^4} V_{\partial}^2 = p_{\partial} + \frac{\gamma}{2g} V_{\partial}^2 + R_{mp} k_v V_{\partial}. \quad (1a)$$

Так как коэффициент при квадрате скорости в левой части намного больше коэффициента при таком же члене правой части, последним можно пренебречь. Умножая обе части равенства на коэффициент пропорциональности между давлением и усилием k_f , после преобразований получим:

$$F - F_c + a_o V_{\partial}^2 - a_1 V_{\partial} = 0, \quad (4)$$

где $F = k_f p$ — действующее усилие,

$F_a = k_f p_{\partial}$ — усилие сопротивления,

$a_o = \frac{\gamma}{2g} \cdot k_f \frac{16k_v^2}{\pi^2 d^4} [кг \cdot м \cdot м^2 / м^2]$ — коэффициент инерционного напора,

$$a_1 = k_f k_v R_{T_p} [кг \cdot м \cdot м].$$

Три последних члена уравнения (4) можно рассматривать как усилие сопротивления, зависящее от скорости. Тогда

$$F - F_c' (V_{\partial}) = 0. \quad (4a)$$

От (1) нетрудно перейти к уравнению для вращающихся гидромашин. Если учитывать объемные потери в гидродвигателе, то n_{∂} [об/мин] будет:

$$n_{\partial} = \frac{Q_T}{k_e} (1 - s'_{np} p - s'_{\partial} p_{\partial}), \quad (5)$$

где k_e — коэффициент пропорциональности между расходом рабочей жидкости и скоростью ротационного гидродвигателя;

s'_{∂} — удельное скольжение гидродвигателя.

Из (2) и (5):

$$V_{\infty} = \frac{4}{\pi d^2} n_{\partial} k_e \frac{1 - s_{\mu} p}{1 - s_{\mu} p - s_{\partial} p_{\partial}}. \quad (6)$$

При изменении давления дробь в (6) изменяется не намного и для упрощения принимается в дальнейшем равной k_s — коэффициенту, определенному при номинальных давлениях.

Задаваясь k_v , можно перейти от линейной к окружной скорости

$$V_{\partial} = n_{\partial} \frac{k_e}{k_v} \cdot k_s. \quad (7)$$

Выполняя преобразования, аналогичные предыдущим, и умножая (1) на k_{μ} — коэффициент пропорциональности между моментом и давлением гидродвигателя, получим:

$$M - M_c + b_o n_{\partial}^2 - b_1 n_{\partial} = 0, \quad (8)$$

где $b_o = \frac{\gamma}{2g} k_{\mu} \cdot \frac{16k_e^2}{\pi^2 d^4} k_s$ [кгм·мин²/об²] — коэффициент инерционного напора для вращающегося гидродвигателя,

$$b_1 = k_{\mu} \frac{k_e^2}{k_v} R_{mp} k_s$$
 [кгм·мин/об].

По аналогии с (4а) последнее уравнение преобразуется в следующее:

$$M - M_c'(n_{\partial}) = 0. \quad (8a)$$

Для преодоления инерционности масс исполнительного механизма, гидродвигателя и массы рабочей жидкости при переходе от одного установленного состояния в другое необходимо некоторое избыточное давление. В зависимости от типа привода его нетрудно привести к усилию либо моменту, величины которых определяются по маховому моменту либо массе, приведенным к валу гидродвигателя. Подсчет масс движущихся частей исполнительного механизма и двигателя не представляет трудностей.

Определим инерционность рабочей жидкости.

Если пренебречь утечками в аппаратуре и гидромашинах, то расход рабочей жидкости через любое сечение системы сохраняется постоянным. Всю гидросистему можно представить в виде трубопровода диаметром d и длиной l_{mp} , которая будет учитывать влияние местных сопротивлений движению рабочей жидкости.

На рис. 1 показана расчетная схема для определения динамического усилия, ускоряющего

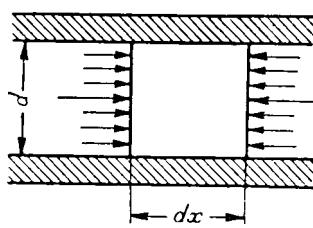


Рис. 1. Расчетная схема для определения динамического усилия.

элементарный объем рабочей жидкости длиной dx и диаметром d . Изменением давления по сечению пренебрегаем. Трубопровод считаем абсолютно жестким.

Результирующее усилие от действия давлений на краях объема: $\frac{\pi d^2}{4} \frac{\partial p}{\partial x} \cdot dx$. Это усилие расходуется на ускорение объема $dx \cdot d$, а также на преодоление трения о трубопровод и перемещение рабочей жидкости в наклонных участках трассы. Средняя скорость движения элементарного объема рабочей жидкости: $V_{\infty} - \frac{1}{2} \frac{\partial V_{\infty}}{\partial x} \cdot dx$. Частная производная скорости по времени определит инерционный перепад давления. Воспользуемся лишь первым, основным, членом этой производной, характеризующим ускорения рассматриваемого объема:

$$\frac{\pi d^2}{4} \frac{\gamma}{g} \frac{\partial V_{\infty}}{\partial x} dx.$$

Потери на трение жидкости о стены трубопровода учитываются в (4а) и (8а). Напорная и сливная трассы в большинстве случаев симметричны и веса рабочей жидкости уравновешиваются, поэтому можно не учитывать влияние этих факторов. Следовательно, с достаточной степенью точности

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\gamma}{g} \cdot \frac{\partial V_{\infty}}{\partial t}. \quad (9)$$

Умножая обе части на k_f и интегрируя по всей длине трассы, после замены V_{∞} на V_{∂} , получим:

$$F_{\text{дин.} \cdot \varphi} = \frac{\gamma}{g} \cdot \frac{4}{\pi d^2} k_f k_v l_{mp} \frac{dv_{\partial}}{dt}. \quad (10)$$

Отсюда гидравлическая масса определится по формуле

$$m_{\varphi} = \frac{\gamma}{g} \cdot \frac{4}{\pi d^2} k_f k_v. \quad (11)$$

Для приводов с вращающимися гидродвигателями после замены k_f на k_{μ} и k_v на k_e гидравлические маховые массы привода

$$GD_{\mu}^2 = 375 \frac{4\gamma}{g\pi d^2} k_{\mu} k_e l_{mp} k_s. \quad (12)$$

Теперь для обоих типов приводов можно записать уравнения движения. Представим их в безразмерной форме:

$$\varphi - \varphi_c + a_o' v_{\partial}^2 - a_1' v_{\partial} = T_{\mu} \frac{dv_{\partial}}{dt}, \quad (46)$$

$$\text{где } a_o' = a_o \frac{V_{\partial o}}{F_{\partial n}}; \quad a_1' = a_1 \frac{V_{\partial o}}{F_{\partial n}},$$

$\varphi = \frac{F}{F_n}$ — относительное усилие;

$\varphi_c = \frac{F_c}{F_n}$ — усилие статического сопротивления в относительных единицах;

$v_{\partial} = \frac{V_{\partial}}{V_{\partial o}}$ — скорость в относительных единицах;

$T'_m = \frac{(m_u + m_e) V_{\partial o}}{60 F_{\partial n}}$ — время, за которое привод под действием номинального усилия достигнет скорости идеального холостого хода гидродвигателя.

$$\mu - \mu_c + b'_o v_o^2 - b'_1 v_o = T'_m \frac{dv_o}{dt}, \quad (86)$$

$$\text{где } b' = b_o \frac{n_{\partial o}^2}{M_{\partial n}}, \quad b'_1 = b_1 \frac{n_{\partial o}}{M_{\partial n}};$$

$\mu = \frac{M}{M_{\partial n}}$ — момент в относительных единицах;

$\mu_c = \frac{M_c}{M_{\partial n}}$ — момент статического сопротивления в относительных единицах;

$v_o = \frac{n_o}{n_{\partial o}}$ — скорость в относительных единицах;

$T'_m = \frac{(GD_u^2 + GD_e^2) n_{\partial o}}{375 \cdot M_{\partial n}}$ — время, за которое привод достигнет скорости идеального холостого хода под действием номинального момента.

От механической постоянной времени, известной в теории электропривода, T'_m отличается в $1/s$ раз, где s — скольжение.

Переходные процессы в гидроприводах. Установлено, что приводы с объемным регулированием скорости гидродвигателя имеют механические характеристики, подобные системе генератор — двигатель.

В этой системе при постоянном потоке двигателя и если пренебречь влиянием индуктивности якорной цепи и реакцией якоря переходный процесс описывается тремя уравнениями: 1) движения, 2) процесса возбуждения генератора и 3) уравнением механической характеристики.

В электрогидроприводах переходный процесс описывается аналогичными уравнениями с тем лишь отличием, что в них закон изменения параметра регулирования отличается от экспоненциального и зависит от сервопривода управления.

Электрическая схема замещения таких систем изображена на рис. 2.

Для процесса разбега до основной скорости, полагая $b'_o = 0$ и $b'_1 \approx 0$, можно записать в относительных единицах следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \mu - \mu_c &= T'_m \frac{dv_o}{dt}, \\ v_o &= u - \mu s_{\partial n} (\sigma + 1), \\ u &= u(t). \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

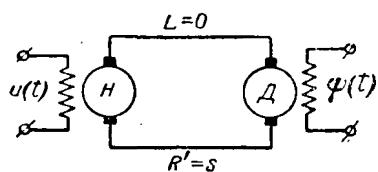


Рис. 2. Электрическая схема замещения систем объемного регулирования скорости гидродвигателя при управлении параметром регулирования.

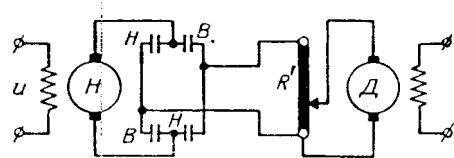


Рис. 3. Электрическая схема замещения гидропривода с золотниковым управлением.

Операторное изображение решения этой системы при нулевых начальных условиях относительно скорости дает:

$$N_o(p) = \frac{1}{U(p) 1 + \mu_c s_{\partial n} (\sigma + 1) + T_m p}, \quad (14)$$

где $T_m = T'_m s_{\partial n} (\sigma + 1)$ — механическая постоянная времени привода,

$$U(p) \div u(t).$$

Оригинал уравнения (14) для $u(t)$ не приводит к окончательному решению. Целесообразно предварительно сравнить значение T_m и t_y — время, в течение которого величина параметра регулирования достигнет установленного значения. При $T_m \ll t_y$ можно считать приближенно $N_o(p) \approx U(p)$ и $v_o(t) \approx u(t)$. Это свидетельствует о том, что переходный процесс изменения скорости следует за движением сервопривода управления. При определенных соотношениях T_m и t_y построение переходного процесса выполняется путем соответствующего пересчета ординат кривой, характеризующей движение сервопривода.

Также будет описываться переходный процесс в системах объемного регулирования с поршневым неротационным гидродвигателем, когда его включение осуществляется изменением параметра u . Большая группа гидроприводов, в основном с возвратно-поступательным движением, управляется с помощью золотников. Электрическая схема замещения такого гидропривода представлена на рис. 3 и справедлива для любой системы с золотниковым управлением. Золотник выделен на рисунке и представлен в виде сочетания реверсивного контактного моста и потенциометра, включенного в его диагональ. Двигатель включен на потенциометр, подвижный контакт которого при разбеге и торможении перемещается сервомотором по некоторому закону. Перемещение движка можно рассматривать, как изменение расхода рабочей жидкости через золотник. Это соответствует: а) в системах объемного регулирования — изменению u от 0 до u_y , где u — параметр регулирования; б) в системах с дросселем, включенным последовательно гидродвигателю, — изменению u_f от 0 до u_{fy} , где u_f — относительное открытие щели в дросселе; в) в системах с дросселем, включенным параллельно гидродвигателю, — изменению u от 0 до 1, так как расход рабочей жидкости через дроссель и гидродвигатель сохраняется постоянным.

При малых величинах механической постоянной времени переходный процесс, как и в предыдущем случае, зависит в основном от законов

движения золотника. Рассмотрим процесс торможения при золотниковом управлении.

Нетрудно установить, что при быстром отключении двигателя (рис. 3) его якорь окажется замкнутым накоротко. Вследствие запаса кинетической энергии, накопленного в движущихся частях системы, электродвигатель работает как генератор и оказывается в режиме короткого замыкания. Малое сопротивление якоря обуславливает большой толчок тока.

Принимая соответствие давления — току и производительности (расхода) — напряжению (э. д. с.), нетрудно с позиций теории электропривода объяснить природу гидравлических ударов.

Отключение гидродвигателя от гидронасоса и запирание напорного и сливного патрубков аналогично замыканию якоря электродвигателя на сопротивление. Благодаря запасенной в системе кинетической энергии поршень будет стремиться к перемещению. В пределах рабочих давлений рассматриваемых приводов рабочая жидкость несжимаема. Следовательно, вся энергия будет расходоваться на повышение давления. Определить его величину можно, руководствуясь следующими соображениями. В момент переключения золотника расход рабочей жидкости через гидродвигатель равен Q_d , или в относительных единицах — v_d . Сопротивление гидродвигателя равно его скольжению — s_{dh} (для безразмерной формы уравнений). Тогда

$$\varphi_{kz} = \frac{v_d}{s_{dh}}. \quad (15)$$

Давление

$$p_{kz} = p_{dh} \frac{v_d}{s_{dh}}.$$

Так как $v_d \gg s_{dh}$, то и давление в момент переключения золотника оказывается намного большим номинального, что вызывает гидравлический удар, разрушительно действующий на механизм. Устранить удары можно путем увеличения скольжения гидродвигателя. Это легко осуществить в системах с дросселем, включенным параллельно гидродвигателю. В этом случае дроссель выступает в роли сопротивления динамического торможения, а закон торможения определяется характеристикой дросселя.

Во всех других схемах при отключении гидродвигателя золотник должен двигаться некоторое время, достаточное для "разрядки" кинетической энергии, запасенной в механизме. Процесс аналогичен постепенному выведению сопротивления на схеме замещения (рис. 3) после размыкания реверсивных контактов.

Механические постоянные времени гидроприводов. Оценим постоянные времени гидроприводов для наиболее распространенных типов с поршневым неротационным гидродвигателем. Как показывают расчеты, гидравлическая масса составляет в среднем 2...10% от массы движущихся частей исполнительного механизма и гидродвигателя, т. е. с достаточной степенью точности для ориентировочных расчетов можно при-

нимать $m \approx 1,05 m_{zz}$. В таблице приведены значения механических постоянных времени для ряда исполнительных механизмов. Меньшие постоянные времени имеют приводы, сочетающие малые скорости со значительными усилиями.

Таблица 1

Наименование исполнительного механизма	Вес движущихся частей, кг	Номинальное усилие, кг	Скорость идеального холостого хода, мм/мин	Скольжение системы	Постоянная времени, мсек
Продольно-строгальный станок	20 000	10 000	45,3	0,04	6,4
Протяжной станок двойного действия для наружной прокладки	2 800	7 500	9,05	0,048	0,29
Протяжной станок для внутренней прокладки	110	6 500	9,25	0,064	0,0179
Поперечно-строгальный станок	60	1 120 1 700 2 650	30,6 22,7 15,75	0,02 0,03 0,047	0,0558 0,0417 0,0288

Выводы. По пусковым свойствам электрогидроприводы можно разделить на управляемые с помощью золотника и управляемые путем изменения параметра регулирования. Электрическая схема замещения второй из названных групп аналогична системе генератор — двигатель. Для приводов с золотниками схема замещения напоминает управление с помощью программного контроллера в сочетании с реверсивным контактным мостом. Механические постоянные времени электрогидроприводов с поршневыми неротационными гидродвигателями, подсчитанные по предлагаемым формулам, по величине, как правило, равны десятым и сотым миллисекундам и лишь для крупных приводов достигает миллисекунд. Почти полная безинерционность приводов ставит переходный процесс в зависимость от сервопривода управления. Процесс разбега гидродвигателей зависит только от элементов управления. При золотниковом управлении процесс торможения зависит также от значения допустимого давления гидродвигателя.

Следовательно, в исполнительных механизмах с возвратно-поступательным движением рабочего органа при требовании высокой скорости отработки сигнала электрогидроприводы при соответствующей конструкции серводвигателя управления получают преимущества перед электрическими приводами. Исключение может составить управление с помощью магнитных муфт, где механические постоянные времени привода малы. В случае сравнения этих приводов необходимо сопоставить закон движения сервопривода управления гидросистемой и закон возбуждения муфты. Однако даже в случае одинакового быстродействия обеих систем за электрогидравлической сохраняется простота конструкции.

Литература

М. Г. Чиликин, А. М. Корытин. Механические характеристики электрогидроприводов, Электричество, № 4, 1953 г.

[26.2.1953]

Выпрямительные ваттметры

Профессор К. Б. КАРАНДЕЕВ и инж. А. Я. ШРАМКОВ

Львовский политехнический институт

Выпрямительные ваттметры, представляющие собой сочетание магнитоэлектрического указателя с некоторой выпрямительной схемой, обладают рядом достоинств и преимуществ перед ваттметрами других систем, главнейшими из которых являются высокая чувствительность и малое собственное потребление, благодаря которым достигается возможность измерения весьма малых мощностей (около 0,01 вт и ниже), сравнительно широкий частотный диапазон применения (до 10 кГц и более), простота, невысокая стоимость, возможность осуществления суммирующих [Л.1] и многопредельных приборов и др.

К недостаткам их следует отнести пока еще недостаточно высокую точность, обусловленную нестабильностью характеристик нелинейных элементов — меднозакисных выпрямителей. По этой причине выпрямительные ваттметры в настоящее время еще не могут быть осуществлены точнее класса 2,5 и по основной погрешности стоят в одном ряду с выпрямительными амперметрами и вольтметрами. Выпрямительные ваттметры практически свободны от влияния формы кривой, в то время как выпрямительным вольтметрам и амперметрам эта зависимость свойственна в силу самого принципа их работы. Температурные погрешности выпрямительных ваттметров, значительные по своей величине для некомпенсированных ваттметров, могут быть уменьшены до вполне допустимых значений.

Следует указать также на возможность использования выпрямительных ваттметров в качестве чувствительных датчиков мощности при осциллографировании мгновенных значений мощности.

На рис. 1 представлена схема выпрямительного ваттметра, описанного в [Л.2] и позднее экспериментально исследованного Л. В. Вороши-

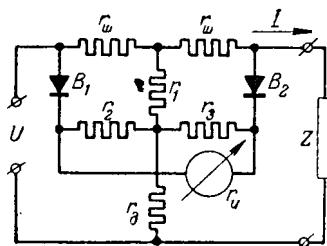


Рис. 1. Схема выпрямительного ваттметра.

Рассматриваются основные принципы измерения мощности при помощи выпрямителей и применение метода эквивалентных э. д. с. к расчету схем выпрямительных ваттметров с меднозакисными выпрямителями. Дан пример расчета схемы выпрямительного ваттметра. Выведены условия самокомпенсации температурной погрешности схем ваттметров.

ловым [Л.3]. Эта схема из-за сравнительной ее сложности обладает рядом недостатков, например трудностью подбора элементов схемы, подгонки их и осуществления

температурной компенсации, от которых в значительной степени свободны схемы ваттметров (рис. 2).

Принцип действия схем и методика их расчета. В основу работы выпрямительных ваттметров положен известный принцип вычитания квадратов суммы и разности двух векторных величин, пропорциональных току и напряжению, в результате чего получается величина, пропорциональная скалярному произведению этих двух величин, т. е. мощности.

Меднозакисные выпрямители в начальной области, до 0,05 ... 0,1 в, дают почти строгую квадратичную зависимость выпрямленного тока от приложенного напряжения. При дальнейшем повышении напряжения эта зависимость нарушается.

Статическая, так называемая вольтамперная, характеристика, снятая на постоянном токе, очень близка к прямой и поэтому может быть описана уравнением прямой линии (рис. 3):

$$r = r_0 - bi. \quad (1)$$

Отсюда выражение для вольтамперной характеристики получит вид:

$$u = ir = r_0 i - bi^2. \quad (2)$$

Такая аппроксимация вполне удовлетворительно отражает физический процесс вблизи нулевой точки характеристики выпрямителя и практически оказывается приемлемой до напряжений 0,05 ... 0,1 в. При этом обнаруживается, что член bi в уравнении (1) при наибольшем значении тока i , соответствующем границе квадратичной

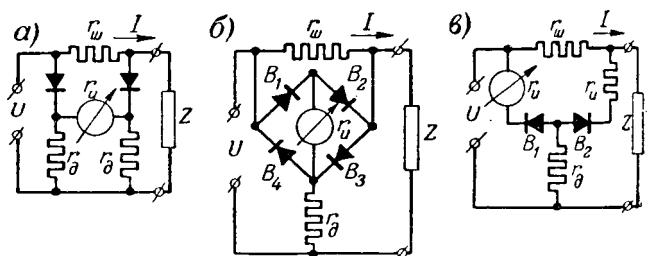


Рис. 2. Схемы выпрямительных ваттметров.

области, достаточно мал по сравнению с членом r_0 , т. е. выпрямители при малых напряжениях проявляют слабо выраженную нелинейность характеристики. Это обстоятельство дает возможность применить к расчету выпрямительных ваттметров метод эквивалентных электродвижущих сил [Л. 4, 5], сущность которого сводится к следующему.

Согласно теореме компенсации [Л. 5] увеличение сопротивления Δr какой-либо цепи k вызывает в цепи j такое же изменение тока Δi_j , которое вызвало бы введение в цепь k электродвижущей силы, равной произведению, взятыму с обратным знаком, из ранее протекавшего в этой цепи тока i_k на изменение сопротивления этой же цепи Δr :

$$\Delta i_j = -\frac{i_k \Delta r}{r_{jk}} = \frac{e}{r_{jk}}. \quad (3)$$

Здесь $r'_{jk} = r_{jk} + \Delta r_{jk}$ — новое значение взаимного сопротивления цепей j и k после изменения цепи k на Δr ; $e = -i_k \Delta r$ — эквивалентная э. д. с. Теорема компенсации справедлива для любого конечного изменения Δr и Δr_{jk} . Однако при анализе слабо выраженных нелинейных цепей, когда Δr , а следовательно, и Δr_{jk} малы, изменением взаимного сопротивления цепей можно пренебречь и с достаточным приближением положить

$$\Delta i_j = -\frac{i_k \Delta r}{r_{jk}}, \quad (4)$$

где r_{jk} — значение взаимного сопротивления до изменения цепи.

Возможность расчета схем с выпрямителями нетрудно показать, если условиться считать, что первоначально (до изменения) вольтамперная характеристика нелинейного элемента выражалась зависимостью (2):

$$u = r_0 i, \quad (5)$$

т. е. элемент был линейным, а второй член уравнения (2) рассматривать ввиду его малости как изменение характеристики. Тогда

$$i = \frac{u}{r_0} \quad (5a)$$

является током, протекавшим в нелинейном элементе до условного изменения его характеристики; r_0 — так называемое „нулевое“ сопротивление выпрямителя, определяемое экспериментально из вольтамперной характеристики при $i = 0$. Допустим теперь, что характеристика изменилась и приняла вид:

$$u = r_0 (i + \Delta i) - b (i + \Delta i)^2, \quad (6)$$

где Δi — изменение тока в цепи, вызванное изменением характеристики элементов;

b — наклон (крутизна), определяемый из вольтамперной характеристики экспериментально (рис. 3). Из (6) можно получить:

$$r = \frac{u}{i + \Delta i} = r_0 - b (i + \Delta i),$$

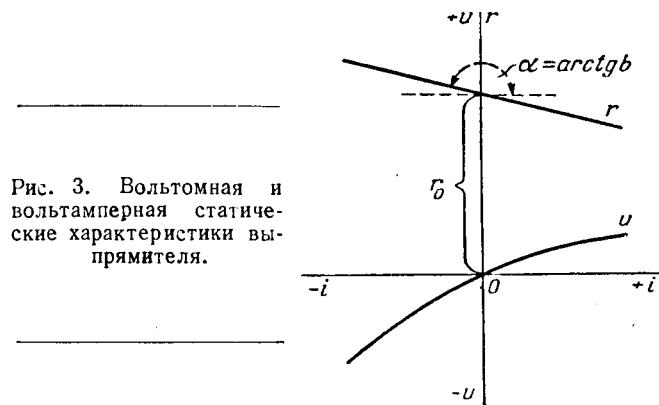


Рис. 3. Вольтамперная и вольтамперная статические характеристики выпрямителя.

т. е.

$$\Delta r = -b (i + \Delta i) \approx -bi, \quad (6a)$$

так как $\Delta i < i$. Согласно теореме компенсации (4) имеем:

$$e = -i \Delta r = bi^2, \quad (7)$$

т. е. эквивалентная э. д. с. в цепи со слабо выраженной нелинейностью пропорциональна квадрату силы тока i , вычисленного первоначально в предположении, что цепь линейна. Поскольку было принято условие (4) ($\Delta r < r$), то распределение токов, вызванных действием этой э. д. с., должно рассматриваться также в предположении, что цепь не изменилась, т. е. взаимное сопротивление цепи, в которой находится нелинейный элемент, и рассматриваемой цепи осталось неизменным. При этом совершенно очевидно, что этот приближенный метод расчета может быть распространен на любое число однородных нелинейностей, содержащихся в цепи, поскольку он сводится к известным методам расчета линейных цепей, для которых применим принцип наложения.

Таким образом, задача расчета цепей со слабо выраженной нелинейностью сводится в основном к двум этапам: 1) нахождение тока i в нелинейном элементе и определение эквивалентной э. д. с., „управляемой“ этим током; 2) нахождение тока Δi , вызванного действием источника э. д. с. e , находящейся в цепи нелинейного элемента и включенной последовательно с ним.

Отметим, что в наиболее часто встречающихся случаях, т. е. при $i = I_m \sin \omega t$,

$$\begin{aligned} e &= bi^2 = bl_m^2 \sin^2 \omega t = \frac{1}{2} bl_m^2 - \frac{1}{2} bl_m^2 \cos 2\omega t = \\ &= bl^2 - bl^2 \cos 2\omega t = E + E_{\sim}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $E = bl^2$ и $E_{\sim} = -bl^2 \cos 2\omega t$. Из (8) видно, что эквивалентная э. д. с. состоит из двух составляющих: постоянной э. д. с. E и переменной э. д. с. E_{\sim} , имеющей двойную частоту. Поскольку нас в дальнейшем будет интересовать лишь постоянная слагающая тока, то второй этап расчета будет сводиться к определению постоянной слагающей тока в интересующей нас цепи, обусловленной действием одной лишь э. д. с. E .

Схемы выпрямительных ваттметров и их расчет. Расчет схем со слабо выраженной нелинейностью с помощью метода эквивалентных э. д. с. сам по себе не нов. В данном случае этот метод обнаруживает ряд ценных преимуществ: простоту, наглядность и достаточную точность. Допустимость использования принципа наложения значительно упрощает методику расчета и позволяет рассматривать напряжение и ток нагрузки Z при определении "управляющего" тока как действующие в схеме независимо друг от друга и имеющие в общем случае сдвиг по фазе, равный φ (см. приложение 1).

Сопоставление расчетных данных с результатами эксперимента показывает, что расчет дает преуменьшенные значения токов I_{cp} с погрешностью в среднем порядка 15%. Такую погрешность расчета ваттметров можно считать вполне допустимой, поскольку она не определяет точности рассчитываемого прибора, зависящей в основном от стабильности характеристик выпрямителей, а показывает отклонение расчетных параметров схемы от действительных, что может быть практически устранено окончательной подгонкой схемы и градуировкой прибора.

Построенный по схеме рис. 2, в многопредельный ваттметр на напряжения 100, 10 и 1 в и токи 1, 0,1 и 0,01 а обнаружил совпадение шкал на всех пределах измерения, которые составляли: верхний — 100 вт, нижний — 0,01 вт на всю шкалу в 100 делений. Шкала равномерная, зависимость показаний от изменений $\cos \varphi$ линейная. Основная погрешность прибора порядка 3%.

Компенсация температурной погрешности схем ваттметров. Характеристики выпрямителей в значительной степени зависят от изменений окружающей температуры, что вызывает, как известно, довольно значительную температурную погрешность выпрямительных приборов вообще и ваттметров в частности. Экспериментально установлено, что с изменением температуры величины r_0 и b уравнения (2) изменяют свои значения и имеют отрицательные температурные коэффициенты. В небольшом интервале температур эту зависимость с достаточным приближением можно описать линейным уравнением:

$$r_{0t} = r_0(1 + a'\theta) \quad \text{и} \quad b_t = b(1 + a''\theta), \quad (9)$$

где a' и a'' — температурные коэффициенты постоянных r_0 и b ; θ — отклонение температуры от нормальной. Отношение $\frac{a''}{a'}$, как установлено из опыта, для различных выпрямителей колеблется от 1,6 до 2,6; абсолютные значения составляют: $a' = -(0,07 \dots 0,08)$ на ${}^{\circ}\text{C}$, $a'' = -(0,13 \dots 0,14)$ на ${}^{\circ}\text{C}$. Знание величин температурных коэффициентов позволяет легко анализировать температурные погрешности схем и находить условия их компенсации. Одним из наиболее действенных способов борьбы с температурной погрешностью выпрямительных амперметров и вольтметров является способ так называемой самокомпенсации, основывающийся на

целесообразном использовании зависимости температурных изменений прямого и обратного токов, а следовательно, и всей погрешности в целом от режима работы выпрямителя, определяющегося в первую очередь линейным добавочным сопротивлением выпрямляющей схемы. Данная зависимость была обнаружена и исследована в [Л. 6]. Этот же метод оказывается возможным применить и для уменьшения температурной погрешности выпрямительных ваттметров (см. приложение 2).

В заключение следует сделать некоторые замечания, касающиеся выбора элементов схемы. Значения сопротивлений r_d и r_w следует рассчитывать таким образом, чтобы при заданных значениях U и I арифметическая сумма амплитуд падений напряжений на каждом выпрямителе, обусловленных в отдельности напряжением U и током I , не превысила значения напряжения на выпрямителе, соответствующего границе квадратичного участка вольтамперной характеристики. При малых пределах измерения (малых U и I), когда условие (1, 3) не выполняется строго, при выводе уравнений чувствительности следует учесть также величины r_d и r_w . Меднозакисные выпрямители должны быть взяты с большой рабочей площадью (около 8 ... 10 см^2), чтобы при малых напряжениях обеспечить токи в измерителе порядка 30 ... 100 мка. Последовательное включение нескольких выпрямителей позволит применить более грубые приборы. В качестве измерителя должен быть взят чувствительный микроамперметр с мощностью полного отклонения порядка 0,3 ... 1 мквт. Совпадение шкал у многопредельных ваттметров может быть достигнуто подгонкой только конца шкалы на каждом пределе, поскольку шкала равномерная.

ПРИЛОЖЕНИЕ I

Проследим методику расчета на примере схемы рис. 2, в. Обозначим на рис. 4, а направления и пути протекания токов I_{mu} и I_{ma} , обусловленных действием соответственно напряжения U и тока I . Полагая, как обычно, что выпрямители имеют идентичные характеристики и что r_d велико, а r_w мало по сравнению с r_u и r_0 , найдем выражения этих токов через напряжение U , ток I и параметры схемы:

$$I_{mu} = \frac{U_m}{2 \left[r_d + \frac{1}{2} (r_0 + r_u) \right]} \approx \frac{U_m}{2r_d} \quad (I,1)$$

и

$$I_{ma} = \frac{I_m r_w}{2r_0 + 2r_u + r_w} \approx \frac{I_m r_w}{2(r_0 + r_u)}, \quad (I,2)$$

так как

$$r_d \gg \frac{1}{2} (r_0 + r_u) \quad \text{и} \quad r_w \ll 2(r_0 + r_u). \quad (I,3)$$

Амплитуды "управляющих" токов I_{m1} и I_{m2} в выпрямителях B_1 и B_2 определяются как геометрическая сумма и разность токов I_{mu} и I_{ma} :

$$I_{m1} = \sqrt{I_{mu}^2 + I_{ma}^2 + 2I_{mu}I_{ma} \cos \varphi}, \quad (I,4)$$

$$I_{m2} = \sqrt{I_{mu}^2 + I_{ma}^2 - 2I_{mu}I_{ma} \cos \varphi}. \quad (I,5)$$

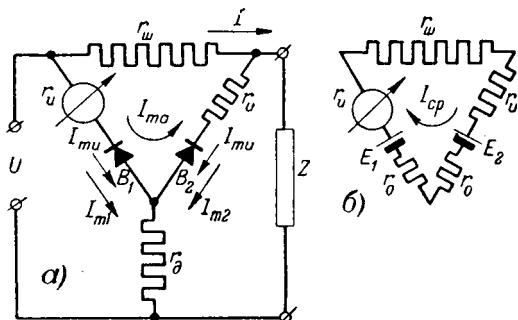


Рис. 4. К расчету схемы ваттметра.

Эквивалентные э. д. с. постоянного тока соответственно будут:

$$E_1 = \frac{1}{2} b I_{m1}^2 \quad \text{и} \quad E_2 = \frac{1}{2} b I_{m2}^2. \quad (I,6)$$

Эквивалентная цепь постоянного тока [с учетом условия (I,3)] представлена на рис. 4,б. Для этой схемы, учитывая (I,1), (I,2), (I,4), (I,5) и (I,6), найдем:

$$I_{cp} = \frac{E_1 - E_2}{2(r_0 + r_u)} = \frac{br_{sh}}{4(r_0 + r_u)^2 r_\theta} U_m I_m \cos \varphi = \\ = \frac{br_{sh}}{2(r_0 + r_u)^2 r_\theta} P, \quad (I,7)$$

где $P = UI \cos \varphi$. Таким образом, из уравнения (I,7) следует, что показание магнитоэлектрического измерителя I_{cp} будет пропорционально активной мощности нагрузки Z . Подобным образом может быть рассчитана схема рис. 2,б. Полагая попрежнему, что r_θ велико, а r_{sh} мало по сравнению с r_0 и r_u , в результате расчета найдем выражение для тока в измерителе:

$$I_{cp} = \frac{br_{sh}}{2r_\theta r_0 (r_0 + r_u)} P. \quad (I,8)$$

Для этой же схемы, но упрощенной путем замены выпрямителей B_3 и B_4 линейными сопротивлениями r_1 , получим:

$$I_{cp} = \frac{br_{sh} r_1}{r_\theta r_0 (r_0 + 2r_u + r_1)^2} P. \quad (I,9)$$

Таким образом, расчет схемы выпрямительного ваттметра на первом этапе складывается из двух операций: определение составляющей тока I_{mu} в выпрямителях, обусловленной действием только одного напряжения U , и определение составляющей тока I_{ma} , обусловленной действием только одного тока I , и затем определение результирующего „управляющего“ тока в каждом выпрямителе как геометрической суммы этих токов.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Рассмотрим возможность уменьшения температурной погрешности на примере схемы рис. 2,в. Подставляя в (I,7) значения r_{0t} и b_t из (9), найдем:

$$I_{cpt} = \frac{b(1 + \alpha''\theta) r_{sh}}{2[r_0(1 + \alpha'\theta) + r_u(1 + \alpha''\theta)]^2 r_\theta} P \approx \\ \approx I_{cp} \frac{1 + \alpha''\theta}{1 + 2 \frac{r_0\alpha' + r_u\alpha''}{r_0 + r_u} \theta}. \quad (II,1)$$

Здесь α_0 — температурный коэффициент сопротивления r_u (меди); сопротивления r_θ и r_{sh} — из манганина. Из выражения (II,1) следует, что ток в измерителе не будет зависеть от изменения температуры, если коэффициенты при θ в числите и знаменателе будут равны, т. е. если выполняется условие:

$$\alpha'' = 2 \frac{r_0\alpha' + r_u\alpha''}{r_0 + r_u}. \quad (II,2)$$

откуда определяется необходимое для самокомпенсации значение сопротивления:

$$r_u = r_0 \frac{2 - \frac{\alpha''}{\alpha'}}{\frac{\alpha''}{\alpha'} - 2 \frac{\alpha_0}{\alpha'}}. \quad (II,3)$$

Для схемы рис. 2,б условие самокомпенсации имеет вид:

$$r_u = r_0 \frac{2 - \frac{\alpha''}{\alpha'}}{\frac{\alpha''}{\alpha'} - 1}. \quad (II,4)$$

Для той же схемы, по упрощенной [см. уравнение (I,9)]

$$2r_u + r_1 = r_0 \frac{3 - \frac{\alpha''}{\alpha'}}{\frac{\alpha''}{\alpha'} - 1}. \quad (II,5)$$

Выполнение условия самокомпенсации у реальных схем ваттметров позволяет заметно снизить температурную погрешность, доведя ее до более или менее допустимых значений порядка 2...3% на 10° С.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Рассчитаем схему рис. 2,в для предела измерения $U = 100$ в и $I = 1$ а. Даны: меднозакисные выпрямители (шайбы 40/15 мм), имеющие средние характеристики $r_0 = 190$ ом, $b = 0,44 \cdot 10^6$ ом/а и предел квадратичности характеристики 0,06 в; магнитоэлектрический микроамперметр с сопротивлением 120 ом. Для обеспечения правильной работы выпрямителей положим (с запасом), что сумма падений напряжений на каждом из них, обусловленная одновременным действием напряжения U и тока I , не превышает 0,04 в и что напряжение и ток каждый в отдельности создают падения напряжения на выпрямителях $U_0 = 0,02$ в. В этом случае необходимое значение добавочного сопротивления и сопротивления шунта будет:

$$r_\theta = \frac{U}{U_0} \frac{r_0}{2} = \frac{100 \cdot 190}{0,02 \cdot 2} \approx 500000 \text{ ом}, \\ r_u = \frac{2(r_u + r_0)}{r_0} \frac{U_0}{I} = \frac{2(120 + 190)0,02}{190 \cdot 1} = 0,065 \text{ ом}.$$

Найдем ток в измерителе по уравнению (I,7) для $U = 100$ в, $I = 1$ а и $\cos \varphi = 1$:

$$I_{cp} = \frac{0,44 \cdot 10^6 \cdot 0,065}{2(190 + 120)^2 \cdot 500000} 100 \cdot 1 \cdot 1 = 30 \cdot 10^{-6} \text{ а.}$$

Экспериментальная проверка дает для схемы рис. 2,в при тех же данных значение тока в измерителе на 18% большее, чем расчет. Такое расхождение объясняется наличием как погрешности примененной методики расчета, так и погрешности, обусловленной подстановкой в расчетную формулу не действительных, а средних значений r_0 и b обоих выпрямителей и номинальных значений сопротивлений r_θ и r_{sh} .

Сопоставление расчетных данных с экспериментом для упрощенной схемы рис. 2,б при выпрямителе другого типа (для случая, когда выпрямители B_3 и B_4 заменены сопротивлениями r_1) дало расхождение около 7%.

Литература

1. А. А. Соловьевников. Основы телемеханики и автоматики. Кубачи, 1934.
2. К. Б. Карапанов. Измерение мощности переменного тока при помощи детекторов. Журнал техн. физики, т. IV, вып. 9, 1934.
3. Л. В. Воронцов. Измерение мощности переменного тока при помощи детекторов. Известия электропромышленности слабого тока, № 1, 1937.
4. В. Н. Мильштейн. Общий метод оценки малых изменений в электрических цепях с помощью эквивалентных схем. Электричество, № 5, 1950.
5. Под редакцией К. М. Поливанова. Физические основы электротехники. Госэнергоиздат, 1950.
6. К. Б. Карапанов. Измерение малых напряжений переменного тока с помощью меднозакисных детекторов. Журнал техн. физики, т. II, вып. 5, 1932.

Катодный осциллограф с периодическим импульсным питанием

Инж. С. М. КАЦНЕЛЬСОН

Уральский политехнический институт им. Кирова

При изучении периодически повторяющихся переходных процессов в ионных вентилях и других аппаратах, работающих на переменном токе 50 гц, значительное увеличение максимальной скопости записи может быть получено применением периодического импульсного питания трубы. Импульсное питание, повторяющееся каждый период, позволяет путем наложения одного изображения на другое повысить яркость записи по сравнению с однократным импульсным питанием при равных величинах напряжения, приложенного к электроннооптической системе трубы. Несмотря на то, что при многократном наложении может иметь место снижение использования начальной эмиссии оксидных катодов за счет явления «утомления» катода, ряд других преимуществ импульсного питания сохраняется.

Наряду с этим периодичность импульсного питания позволяет использовать преимущества, связанные с осциллографированием повторяющихся явлений. Повышение яркости изображения в момент возбуждения экрана и при затухании за счет последовательных возбуждений может быть получено, если в период времени между импульсами имеет место неполное высвечивание люминофора. Отсюда следует, что при одинаковых условиях возбуждения большая скорость записи будет получена на люминофоре с более длительным послесвечением. Кроме того, возможность получения неподвижного изображения исследуемого переходного процесса позволяет сильно увеличивать экспозицию при фотографировании, что также дает возможность значительно повысить максимальную скорость записи.

В схемах, разработанных И. С. Стекольниковым, коммутация высоковольтных цепей выполняется при помощи искровых реле, позволяющих осуществить однократную запись [Л. 1].

Выполнение периодического импульсного питания трубы при помощи искровых реле затруднительно вследствие сравнительно большого времени деионизации искровых промежутков.

Для периодической подачи импульсов высокого напряжения прямоугольной формы на потенциометр электроннолучевой трубы с частотой 50 гц требуется такое реле, которое было бы

Рассматриваются преимущества периодического импульсного питания электроннолучевой трубы при осциллографировании быстропеременных процессов в аппаратах и приборах, работающих на переменном токе промышленной частоты. Приводится схема катодного осциллографа с периодическим импульсным питанием, выполненная на тиатронах, управляемых сеткой во время горения.

способно не только замыкать, но и размыкать цепь тока за весьма небольшое время. Такое реле можно получить при помощи тиатрона, управляемых сеткой во время горения. Как известно,

управляющее действие сетки в тиатроне ограничено. При помощи сетки можно осуществить очень четкое управление моментом начала разряда в тиатроне, но прекращение разряда путем подачи отрицательного потенциала на сетку возможно лишь при малых токах или в случае применения сеток с отверстиями, диаметр которых не превышает 2 мм [Л. 2]. Если через тиатрон протекает ток в несколько миллиампер и диаметр отверстий в сетке тиатрона составляет 4...6 мм, то, подавая на его сетку отрицательный импульс напряжения, можно прервать разряд в течение доли микросекунды. Величина отрицательного потенциала, необходимого для прерывания разряда в тиатроне данной конструкции, растет с увеличением анодного тока.

Возможность сеточного управления разрядом в тиатроне при малых токах позволяет использовать его в различных схемах осциллографирования в качестве реле с чрезвычайно малой инерцией, способного замыкать и размыкать цепь постоянного тока высокого напряжения [Л. 3].

Однако, если через тиатрон протекал большой ток в несколько ампер и затем произошло его снижение до нескольких миллиампер, то гашение тиатрона происходит с запаздыванием. Время деионизации после протекания большого тока в тиатроне может быть сокращено путем подачи повышенного отрицательного потенциала на его сетку.

Принципиальная схема периодического импульсного питания трубы, выполненная при помощи тиатрона, управляемого сеткой во время горения, изображена на рис. 1.

Конденсатор C_1 выпрямительной установки находится все время в заряженном состоянии. Подача прямоугольных импульсов на потенциометр трубы осуществляется зажиганием тиатрона L_1 , а снятие импульсов гашением этого тиатрона. В момент зажигания тиатрона L_1 через него протекает большой ток в несколько миллиампер или десятков ампер, ограниченный небольшим сопротивлением R_1 в цепи анода.

После зажигания тиатрона L_1 ток, протекающий через него, быстро спадает до нескольких миллиампер, и тиатрон гасится отрицательным импульсом, поданным на его сетку через сопротивление R_8 .

При осуществлении периодического импульсного питания необходимо обеспечить правильное распределение напряжения на всей электронно-оптической системе трубы как в начальный момент, так и во время развертки.

Распределение напряжения между электродами трубы при подаче импульса в начальный момент времени зависит от соотношения между электродных емкостей трубы, включая емкости подводящих проводников. Наибольшее влияние на распределение напряжения между электродами трубы в начальный момент времени оказывает емкость C_0 по отношению к земле обмотки трансформатора, питающего цепь накала трубы. Наличие этой емкости приводит к недопустимым перенапряжениям между катодом и управляющей сеткой, а также к запаздыванию открытия луча.

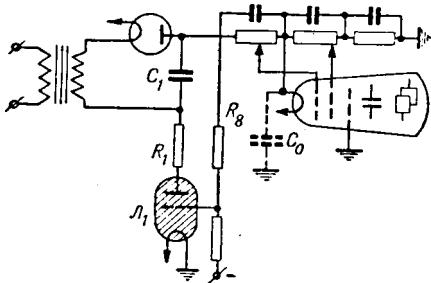


Рис. 1. Принципиальная схема периодического импульсного питания трубы.

Для правильного распределения напряжения между электродами трубы как в начальный момент, так и в последующие моменты времени после подачи на нее прямоугольного импульса необходимо потенциометр трубы выполнять в виде емкостно-омического делителя напряжения.

Чтобы обеспечить принудительное гашение тиатрона L_1 при помощи сетки с целью уменьшить установившееся значение тока, протекающего через тиатрон, омический делитель приходится выполнять высокоомным. Величина его эквивалентного сопротивления рассчитывается так, чтобы ограничить силу установившегося тока до 5...10 мА. Параллельно присоединенный емкостный делитель должен иметь возможно меньшие емкости для сокращения длины фронта волны напряжения, падающей на трубку, а также для быстрого затухания напряжения на потенциометре трубы после гашения тиатрона L_1 .

Принципиальная схема катодного осциллографа с периодическим импульсным питанием приведена на рис. 2.

Развертка времени. Напряжение для развертки времени снимается с емкости C_7 . Включение цепи развертки происходит одновременно с подачей импульса на потенциометр трубы. В приведенной схеме развертка времени для упрощения выполнена несимметричной. Симметричная

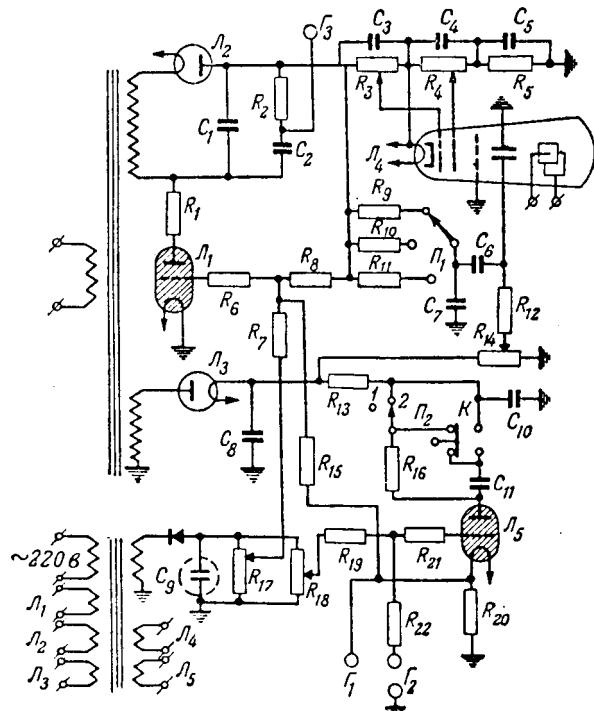


Рис. 2. Схема катодного осциллографа с периодическим импульсным питанием.

развертка легко выполняется в виде отдельной схемы, срабатывающей от синхронизирующего импульса, снимаемого с сопротивления R_{20} .

Синхронизация. Синхронизирующее явление различной формы и длительности подается через гнездо G_1 на сетку тиатрона L_5 , нормально запертое отрицательным смещением. В момент зажигания тиатрона L_5 благодаря наличию шунтирующей емкости C_{11} на сопротивлении R_{20} появляется импульс напряжения положительной полярности, который используется для зажигания главного тиатрона L_1 . По мере заряда емкости C_{11} ток в цепи тиатрона L_5 затухает, достигая установившегося значения 1...1,5 мА. При таком малом токе тиатрон L_5 легко гасится отрицательным смещением на его сетке и остается в погашенном состоянии до следующего синхронизирующего импульса.

Если осциллограф применяется для исследования волновых процессов в обмотках электрических машин, в кабелях и воздушных линиях при помощи анализаторов, посылающих периодические импульсы, синхронизация развертки времени с исследуемым явлением может осуществляться от самого осциллографа. В этом случае на схему анализатора подается синхронизирующий импульс, снимаемый с сопротивления R_{20} . В результате анализатор посыпает волну напряжения на исследуемый объект синхронно с зажиганием осциллографа.

Аналогично выполняется синхронизация при исследовании процессов разряда в ионных вентилях с управляющими сетками.

Кроме периодического импульсного питания, осциллограф может работать с однократным импульсным питанием. Если нажать кнопку K и перевести переключатель P_2 в положение 1, то

к схеме синхронизатора через емкость C_{11} подводится напряжение и первый синхронизирующий периодический импульс вызовет зажигание тиатрона L_5 . Повторные импульсы не вызывают срабатывание тиатрона L_5 вследствие заряда емкости C_{11} . Однократная синхронизация может применяться в том случае, когда при большой скорости развертки трудно получить полную неподвижность изображения на экране трубы. Осциллограф может также работать с генератором импульсов. При нажатии кнопки K и зажигании тиатрона L_1 импульс высокого напряжения отрицательной полярности амплитудой 6...10 кв подается с емкости C_2 на поджигание запального разрядника генератора импульсов.



О ВЛИЯНИИ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ НА ВРЕМЕНА ТРОГАНИЯ И ОТПУСКАНИЯ БРОНЕВОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТА С МАССИВНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

Кандидат техн. наук И. И. ПЕККЕР

Московский энергетический институт им. Молотова

Введение. Времена трогания и отпускания определяются временами нарастания или спадания магнитного потока под торцом сердечника электромагнита до некоторого заданного значения. При всяком изменении потока в массивных частях магнитной цепи электромагнита возникают вихревые токи. Большинство авторов [Л. 1, 2, 3 и др.], рассматривая вопрос о влиянии вихревых токов на время срабатывания электромагнита, ограничиваются общими замечаниями о физике явления, не давая методики количественной оценки этого влияния. Между тем при создании электромагнитов, срабатывающих за ограниченный промежуток времени, необходима количественная оценка всех параметров, определяющих это время, в частности, и вихревых токов.

Некоторые авторы, решая задачу о влиянии вихревых токов, вводят грубые упрощения, в результате решение не отражает физики процессов.

Так, в применяющемся до сих пор методе [Л. 4, 5], предложенном Р. Рюденбергом [Л. 6], одним из основных упрощений является предположение о бесконечной проницаемости стали магнитопровода. Вихревые токи, возникающие в теле массивного магнитопровода, вызывают неравномерность распределения магнитного потока по его сечению и тем самым как бы изменяют его магнитную проницаемость. Эффект этот в принципе аналогичен поверхностному эффекту в электрических проводниках при протекании через них переменного тока. Так же, как лишено

Предлагается аналитический метод анализа переходных процессов в магнитных системах с массивным магнитопроводом. На основе анализа даются рекомендации для достижения быстродействия электромагнита.

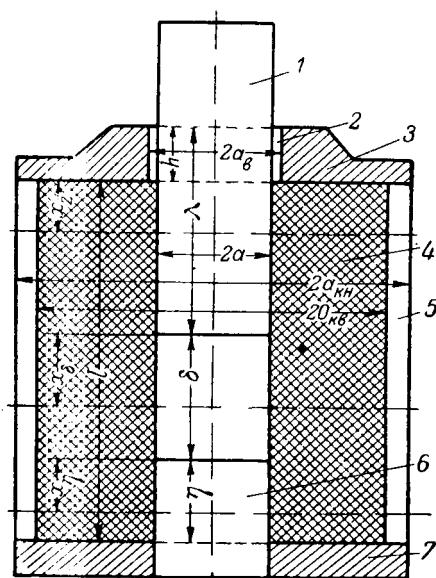
смысла рассмотрение изменения электрического сопротивления сверхпроводника под действием поверхностного эффекта, нельзя рассматривать явления, связанные с вихревыми токами в магнитопроводе, если даже на каком-то этапе этого рассмотрения допустить, что проницаемость его бесконечна.

Однако сложность явлений, связанных с вихревыми токами, вынуждает прибегать при их рассмотрении к некоторым упрощениям. Это естественно и целесообразно. Важно только, чтобы эти упрощения не затрагивали основы явления. С этой точки зрения вслед за Т. Г. Сорокером [Л. 7] и некоторыми другими авторами можно принять допущение, что магнитное сопротивление воздушных промежутков не зависит от процессов, происходящих в стали.

Также с целью упрощения рассматриваемой задачи влияние вихревых токов будем учитывать только в сердечнике и стопе электромагнита, где оно наиболее существенно.

Для решения поставленной задачи воспользуемся введенным в указанной работе Т. Г. Сорокера понятием операторного магнитного сопротивления.

Операторное магнитное сопротивление. По аналогии с электрическим магнитное сопротивление можно определить как отношение н. с., действующей на некотором участке магнитной цепи, к потоку, проходящему через сечение этого участка. Вследствие наличия поверхностного эффекта при переходных процессах магнитное сопротивление изменяется во времени. Для сер-



Схематическое изображение броневого электромагнита.

дечника и стопа в форме круглого цилиндра (см. рисунок) это явление можно описать с помощью следующих трех уравнений:

$$-\frac{\partial H_z(r,t)}{\partial r} = \delta(r,t), \quad (1)$$

$$\delta(r,t) = -\frac{\gamma}{2\pi r} \frac{\partial \Phi_z(r,t)}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\Phi_z(r,t) = \int_0^z B_z(r,t) 2\pi r dr. \quad (3)$$

Здесь H_z — аксиальная слагающая напряженности магнитного поля; r — радиус, проведенный от оси сердечника; t — время, отсчитываемое от начала процесса; δ — плотность вихревых токов; γ — удельная электропроводность материала сердечника; Φ_z , B — поток и индукция в данном сечении.

Полагая магнитную проницаемость постоянной и решая совместно переписанные в операторной форме уравнения (1)...(3), получим:

$$R_1(a, p) = \frac{H_z(a, p)}{\Phi_z(a, p)} = - \frac{\gamma p}{2\pi ja\sqrt{\gamma\mu p}} \frac{J_0(ja\sqrt{\gamma\mu p})}{J_1(ja\sqrt{\gamma\mu p})}; \quad (4)$$

a — наружный радиус сердечника (стопа); p — оператор; μ — магнитная проницаемость стали магнитопровода; J_0 и J_1 — бесселевы функции первого рода нулевого и первого порядка.

$R_1(a, p)$ назовем удельным (на единицу длины) операторным магнитным сопротивлением сердечника или стопа.

Пользуясь понятием операторного магнитного сопротивления, можно расчет магнитной цепи

для переходного режима проводить аналогично, тому, как и для установившегося режима.

Влияние вихревых токов на процесс трогания. Временем трогания обычно называют время, протекшее от момента подключения обмотки электромагнита к источнику питания до начала движения его якоря.

До момента трогания магнитная цепь, как правило, имеет значительный воздушный зазор. В обычных условиях магнитная проницаемость стали во много раз больше проницаемости воздуха. Если влияние эффекта вытеснения незначительно, то магнитным сопротивлением стальных участков магнитопровода по сравнению с сопротивлением воздушных промежутков в процессе включения можно пренебречь. Следовательно, задача оценки влияния вихревых токов в данном случае сводится к оценке соотношения магнитных сопротивлений воздушных промежутков и магнитного сопротивления стали магнитопровода с учетом и без учета эффекта вытеснения потока.

Если предположить, что, несмотря на эффект вытеснения потока, магнитное сопротивление стальных участков магнитопровода значительно меньше сопротивления воздушных зазоров, то закон нарастания тока определяется известным уравнением:

$$i(t) = I_{ucm}(1 - e^{-\alpha t}), \quad (5)$$

где $a = \frac{r}{L}$, r и L — активное сопротивление и индуктивность обмотки электромагнита.

Очевидно, что в рассмотренном случае и поток в любом сечении магнитопровода будет нарастать по тому же закону:

$$\Phi_z(t) = \Phi_{z_{vcm}}(1 - e^{-at}), \quad (6)$$

где $\Phi_{z \text{ уст}}$ — установившееся значение потока в сечении с координатой z .

Рассчитав магнитную цепь и зная закон распределения установившегося значения потока вдоль магнитопровода, очевидно можно с достаточной для практических целей степенью точности найти значение n . с., расходуемой на проведение потока через сталь и через воздух для любого момента времени. Как было оговорено ранее, предполагается, что при этом n . с. стали значительно меньше n . с. воздуха.

Теперь поставим следующую задачу. Примем, что поток нарастает по закону (6) и определим, какая н. с. должна быть приложена в случае, если имеют место вихревые токи. Если и в этом случае н. с. стали окажется значительно меньше н. с. воздуха, то влиянием вихревых токов можно пренебречь. В противном случае это влияние необходимо учесть.

Намагничивающая сила стали может быть найдена как интеграл

$$F_{z,cm} = \int_0^z H_z(t) \, dz. \quad (7)$$

Здесь $F_{z,cm}$ — н. с. стали на участке от 0 по z , $R_1(t)$ — магнитное сопротивление единицы длины магнитопровода, $H_z(t)$ — аксиальная слагающая напряженности магнитного поля в магнитопроводе на участке с координатой z в момент времени t .

Введем выражение переходной магнитной проводимости при единичном потоке аналогично тому, как это делается для электрического тока. Для этого с помощью формулы Хевисайда найдем оригинал выражения (4). После некоторых преобразований из (4) можно получить:

$$R_1(t) = \frac{1}{\pi a^2 \mu} \left[1 + \sum_{k=1}^{k=\infty} e^{p_k t} \right], \quad (8)$$

$$p_k = -\frac{x_k^2}{a^2 \mu}, \quad (9)$$

x_k — аргумент бесселевой функции первого рода первого порядка, при котором она обращается в нуль.

Величину μ , фигурирующую в этом и дальнейшем выражениях, целесообразно брать среднюю для данного диапазона индукций.

Теперь величину $H_z(t)$ можно определить как

$$H_z(t) = \Phi_z(0) R_1(t) + \int_0^t \Phi_z'(\tau) R_1(\tau) d\tau. \quad (10)$$

Подставляя в (10) соответствующие величины из (6), (8) и (9), после ряда преобразований получим:

$$H_z(t) = \frac{\Phi_z \text{ уст}}{\pi a^2 \mu} \left[1 - e^{-at} + \sum_{k=1}^{k=\infty} \frac{a}{a + p_k} (e^{p_k t} - e^{-at}) \right], \quad (11)$$

k — натуральные числа 1; 2; 3 и т. д.

При нахождении значения $H_z(t)$ можно ограничиться первыми k членами. Для оценки значения суммы остальных членов ряда можно воспользоваться следующими выражениями.

Для больших k имеют место соотношения:

$$|p_k| = \frac{x_k^2}{a^2 \mu} \gg a, e^{-at} \gg e^{p_k t}, x_k \approx k\pi.$$

Учитывая приведенные соотношения, а также, что

$$\sum_{k=1}^{k=\infty} \frac{1}{k^2} = \frac{\pi^2}{6},$$

можно сумму членов ряда, стоящего в скобках, с номерами от k и выше представить в виде:

$$\sum_{k=k}^{k=\infty} \frac{a}{a + p_k} (e^{p_k t} - e^{-at}) \approx \frac{a a^2 \mu}{\pi^2} e^{-at} \left(\frac{\pi^2}{6} - \sum_{k=1}^{k=k} \frac{1}{k^2} \right). \quad (12)$$

Выражение в квадратных скобках (11) не зависит от координаты z и, следовательно, значение н. с. стали при переходном процессе, определяемое уравнением (7), отличается от н. с. при установленном режиме только общим множителем. В действительности это не совсем так.

При изменении магнитного сопротивления стали меняется и картина полей рассеяния, а следовательно, и закон распределения потока вдоль длины сердечника электромагнита. Однако, как показывает опыт, этим изменением распределения потока можно в большинстве случаев пренебречь, не внося существенного увеличения погрешности расчета.

Влияние вихревых токов на процесс отпускания. Временем отпускания называют время от начала процесса отключения обмотки электромагнита источника питания до начала движения его якоря.

Основное отличие состояний магнитной системы в процессе отпускания по сравнению с процессом трогания состоит в следующем:

1) Воздушные промежутки в магнитной системе малы и их сопротивление того же порядка, что и сопротивление стали, а зачастую и значительно меньше его.

2) В большинстве практически встречающихся случаев в момент отключения магнитная система насыщена.

Если бы вихревые токи отсутствовали, то вместе со спаданием тока в обмотке спадал бы и поток. При спадании тока до нуля поток также равнялся бы нулю (явление гистерезиса здесь не рассматривается). Опыт, однако, показывает, что вследствие влияния вихревых токов спад потока может значительно отставать от спада тока. Например, при опытных исследованиях электромагнита с диаметром сердечника 100 мм в момент спадания тока до нуля спустя 0,03 сек поток составляет 70% своего начального значения и только спустя 0,1 сек он снизился до 10%.

При исследовании процесса отпускания магнитная цепь практически замкнута, и влиянием рассеяния потока в первом приближении можно пренебречь.

Для облегчения учета насыщения системы кривая намагничивания приближенно изображается ломаной линией, состоящей из двух отрезков прямой, определяемых уравнением в насыщенной части:

$$B = B_0 + \mu_1 H \quad (13)$$

и в ненасыщенной части

$$B = \mu_2 H, \quad (14)$$

где B_0 — значение индукции, отсекаемое на вертикальной оси прямой, μ_1 и μ_2 — средние значения дифференциальной проницаемости для соответствующих диапазонов значений индукции.

Магнитное сопротивление магнитной цепи может быть представлено в виде суммы двух слагаемых:

$$R_s = R(p) + R_z, \quad (15)$$

где $R(p)$ — сопротивление массивных частей магнитопровода, зависящее от времени и выраженное в операторной форме:

$$R(p) = lR_1(p), \quad (16)$$

где l — суммарная длина сердечника и стопа; R_n — сопротивление воздушных промежутков и ламелированных частей магнитопровода (если таковые имеются).

Введем понятие переходной проводимости при единичной н. с.:

$$G_1(t) \doteq G(p) = \frac{1}{R(p) + R_n}. \quad (17)$$

Подставляя в (17) значение $R(p)$ из (16) и (4) и воспользовавшись формулой Хевисайда, получим:

$$G_1(t) = G_{ycm} - G_{cm.c} \sum_{k=1}^{k=\infty} \frac{e^{p_k t}}{\beta_k}. \quad (18)$$

Здесь

$$G_{ycm} = \frac{1}{R_{cm.c} + R_n}; \quad R_{cm.c} = \frac{l}{\pi a^2 \mu};$$

$$G_{cm.c} = \frac{1}{R_{cm.c}}, \quad p_k = -\frac{x_k^2}{a^2 \mu};$$

x_k — корни уравнения;

$$\frac{J_0(x)}{J_1(x)} = -\frac{2}{x} \frac{R_n}{R_{cm.c}},$$

которое легко решается графически:

$$\beta_k = \left(\frac{R_n}{R_{cm.c}} \right)^2 + \frac{R_n}{R_{cm.c}} + \frac{x_k^2}{4}. \quad (19)$$

Отключение в обмотке электромагнита может происходить либо коротким замыканием ее концов, либо разрывом цепи. Здесь будет рассмотрен второй случай. С помощью приведенной методики легко может быть рассмотрен и первый случай.

При разрыве цепи ток спадает до нуля не мгновенно, а в некоторое время, пока в месте разрыва горит дуга, и зависит от ряда факторов — способа дугогашения, начального значения тока, напряжения и т. д. Аналитическое выражение закона спада тока в катушке при разрыве ее цепи пока не найдено. Поэтому в настоящей работе закон спада тока задается на основании имеющихся опытных данных. Закон спада потока исследуется в зависимости от закона спада тока.

Процесс, происходящий при отключении электромагнита, можно представить как результат наложения двух процессов — стационарного, имевшего место до момента отключения, и переходного, возникающего при приложении к магнитной цепи электромагнита фиктивной н. с., сводящую ранее действующую н. с. стационарного состояния к нулю.

Приложенная н. с. должна быть обратна по знаку н. с., действовавшей при стационарном режиме, и изменяется по такому закону, чтобы

в любой момент времени сумма обеих н. с. давала истинное значение н. с., действующей в данный момент. При этом следует помнить, что методом наложения можно пользоваться только при условии, что параметры цепи не зависят от величины н. с. и потока и не изменяются во времени. В настоящей работе кривая намагничивания изображена в виде двух отрезков прямой, и расчет следует вести отдельно для каждого из прямолинейных участков кривой намагничивания. В области больших насыщений темп спада потока значительно выше, чем когда магнитная система не насыщена, поэтому рассмотрение процесса ниже колена кривой намагничивания можно проводить, исходя из предположения, что начальное распределение потока по сечению сердечника — равномерное.

В данной статье будет выведено уравнение спада потока только для случая, когда ток спадает по прямолинейному закону, как это часто встречается на практике. Однако теми же методами анализ можно провести и для спада тока по любому закону.

Закон изменения потока при приложении некоторой н. с. может быть представлен уравнением

$$\Phi(t) = G_1(t) i(0) w + \int_0^t G_1(t-\tau) i'(\tau) w d\tau. \quad (20)$$

Пусть ток спадает до нуля по линейному закону за время T , тогда выражение фиктивной н. с., прилагаемой к магнитной системе, будет в интервале времени от нуля до $t=T$ иметь вид:

$$i'(t) w = -\frac{Iw}{T} t. \quad (21)$$

Для времени $t > T$, для того чтобы было выполнено условие о том, что н. с. не возрастает больше своего установившегося значения, необходимо приложить еще одну фиктивную н. с.:

$$i''(t) w = \frac{Iw}{T} (t-T), \quad (22)$$

Тогда для $t > T$ значение фиктивной прикладываемой н. с. будет:

$$i(t) w = -\frac{Iw}{T} t + \frac{Iw}{T} (t-T) = -Iw.$$

Подставляя в (20) соответствующие величины из (18), (19) и (21), (22), получим закон спада потока за время спада тока в обмотке электромагнита до нуля:

$$\Phi(t)_{0 < t < T} = \Phi_{ycm} - \frac{Iw}{T} \left(G_{ycm} t + G_{cm.c} \sum_{k=1}^{k=\infty} \frac{1 - e^{-p_k t}}{p_k \beta_k} \right). \quad (23)$$

Закон спада потока после исчезновения тока в обмотке электромагнита:

$$\Phi(t)_{t > T} = \Phi_{ycm} - Iw G_{ycm} + \frac{Iw}{T} G_{cm.c} \sum_{k=1}^{k=\infty} \frac{1 - e^{-p_k T}}{p_k \beta_k} e^{p_k t}. \quad (24)$$

Пользуясь этими выражениями, можно получить ориентировочное время спадания потока до заданной величины, определяющей момент отпускания электромагнита.

Анализируя выражения (23) и (24), можно сделать следующие выводы о влиянии различных факторов на скорость спада потока при отключении обмотки электромагнита:

1. Чем больше магнитное сопротивление участков, в которых не наводятся вихревые токи (R_n), по сравнению с сопротивлением массивных участков ($R_{cm.c}$), тем быстрее затухает поток.

Следовательно, для убыстрения электромагнита при отпусканье целесообразно вводить значительные немагнитные прокладки. Напротив, для получения наибольшего замедления электромагнита следует делать магнитную цепь с минимальным числом разъемов. Поверхностистыка в разъемах следует тщательно обрабатывать.

2. Чем больше произведение $a^2\mu$, тем медленнее затухает поток. Однако степень влияния величин, входящих в это произведение, различна, так как $a^2\mu$ входит также в выражения для G и β , в то время как γ содержится только в показателе степени p .

3. В тех случаях, когда проницаемость материала сердечника мала, поток может спадать с небольшим отставанием от тока. Значительное отставание потока от тока наблюдается в области высоких проницаемостей.

Из этого обстоятельства следует, что для получения быстродействия при отпусканье целесообразно, чтобы значение потока, соответствующее отпусканью, лежало бы в области малых значений μ выше колена кривой намагничивания.

4. Увеличение скорости спадания тока уменьшает время отпускания, однако даже при мгно-

венном исчезновении тока скорость спадания потока остается конечной, что, в частности, видно из выражения (18). При этом следует заметить, что в реальных устройствах скорость спадания тока всегда остается конечной и увеличению ее препятствует целый ряд факторов, среди которых весьма существенными являются ограниченная дугогасящая способность отключающих аппаратов и ограниченный уровень изоляции обмотки электромагнита.

В практически встречающихся устройствах время спадания тока до нуля бывает того же порядка, что и время отпускания. Только в медленно действующих электромагнитах с низким коэффициентом возврата время спада тока значительно меньше времени отпускания.

В заключение следует заметить, что предлагаемая методика анализа переходных процессов в магнитных системах с массивным магнитопроводом может быть использована для рассмотрения ряда явлений, например при исследовании поведения массивного стального сердечника в магнитном поле переменного тока.

Литература

1. А. Я. Буйлов. Основы электроапаратуростроения. ГЭИ, 1946.
2. Н. Е. Лысов. Расчет электромагнитных механизмов. Оборонгиз, 1948.
3. Ротерс. Электромагнитные механизмы. Госэнергоиздат, 1949.
4. М. И. Виттенберг. Расчет телефонных и кодовых реле. Госэнергоиздат, 1947.
5. С. Я. Дунаевский. Влияние вихревых токов на процесс установления потока. Электричество, № 2, 1951.
6. Р. Рюденберг. Явления неустановившегося режима в электрических установках. ГИТИ, 1930.
7. Т. Г. Сорокер. О переходных процессах в цепях с массивными сердечниками. Электричество, № 5, 1951.

[25. 6. 1952]



Воскообразование в изоляции бумажно-масляных конденсаторов

Доктор техн. наук В. Т. РЕННЕ, кандидат техн. наук В. М. ФАЙНИЦКИЙ
и инж. Д. С. ВАРШАВСКИЙ

Научно-исследовательский институт постоянного тока МЭСЭП

Практика применения бумажно-масляных конденсаторов в целях улучшения коэффициента мощности показывает, что время от времени имеют место случаи их пробоя. Эти случаи обычно учащаются с увеличением времени эксплуатации конденсаторных батарей, что свидетельствует о том, что в диэлектрике конденсатора происходит процесс старения, приводящий к постепенному снижению электрической прочности конденсаторов.

Интересные данные о сроке службы бумажно-масляных конденсаторов были получены при обследовании в системе Мосэнерго и Ленэнерго ряда конденсаторных батарей, установленных в период времени с 1936 по 1939 г. Количество обследованных конденсаторов при каждом значении срока службы составляло от 165 до 345 штук. На рис. 1 показана зависимость количества поврежденных конденсаторов (т. е. вероятности пробоя конденсаторов) от продолжительности их работы, по данным этого обследования.

Данные рис. 1 показывают, что за первые 2...3 года пробивалось 20...25% конденсаторов, а остальные продолжали в основном работать; по истечении 5...6 лет количество пробоев снова начинает увеличиваться, сначала относительно медленно, но после 7...8 лет достаточно быстро. По данным рис. 1 можно сделать вывод о том, что для бумажно-масляных конденсаторов до-военного изготовления срок службы 10 лет, который иногда учитывается в различных расчетах [Л. 1], является завышенным; если принять за среднее значение срока службы промежуток времени, при котором выходит из строя не более 50% установленных конденсаторов, то, судя по кривой на рис. 1, это среднее значение можно принять равным лишь 7,5 годам.

Нами было проведено исследование ряда конденсаторов послевоенного изготовления, снятых с установок для улучшения коэффициента мощности вследствие их пробоя, наступившего спустя один-два года после начала эксплуатации. Результаты этого исследования могут пролить некоторый свет на ход процесса старения бумажно-масляных конденсаторов при длительном воздействии переменного напряжения.

Современный бумажно-масляный конденсатор состоит из ряда отдельных секций, соединенных

Рассматривается вопрос аварийности силовых бумажно-масляных конденсаторов и отмечается, что одной из причин, вызывающих преждевременный пробой этих конденсаторов, является развитие ионизации в диэлектрике, сопровождаемое разложением масла и воскообразованием. Приводятся данные по распределению воска по толщине диэлектрика и об изменении электрических свойств, связанном с процессом воскообразования.

между собой последовательно-параллельно в соответствии с рабочим напряжением.

Поэтому, сняв с пробитого конденсатора крышку и произведя разъединение секций, всегда можно найти в таком конденсаторе достаточное число непробитых секций и измерить их электрические характеристики.

Для исследования были взяты конденсаторы типа КМ6-10-1 выпуска 1947 г. (срок службы 2 года), изготовленные из бумаги нормальной

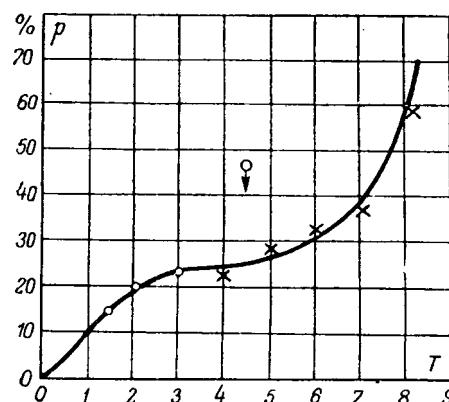


Рис. 1. Средние данные о количестве пробоев бумажно-масляных конденсаторов до-военного изготовления в зависимости от длительности их работы. Данные: О — Ленэнерго; Х — Мосэнерго; p — вероятность пробоя конденсаторов в процентах; T — продолжительность работы батарей в годах.

плотности, и выпуска 1949 г. (срок службы 1 год), изготовленные из бумаги повышенной плотности. В обоих случаях диэлектрик в каждой секции состоял из 7 слоев бумаги толщиной 12 мкм, но расчетное значение рабочей напряженности было различным: в секциях конденсаторов выпуска 1947 г. оно составляло 12,5 кв/мм, а в секциях конденсаторов выпуска 1949 г. — 15 кв/мм. Проведенные нами измерения показали, что емкость секций в исследованных конденсаторах колебалась в пределах от 1,8 до 2,4 мкф, а тангенс угла потерь, измеренный при 60°C и частоте 50 Гц, составлял от 0,004 до 0,04.

Определение электрической прочности масла, взятого из исследованных конденсаторов, а также (для сравнения) из конденсаторов изготовлен-

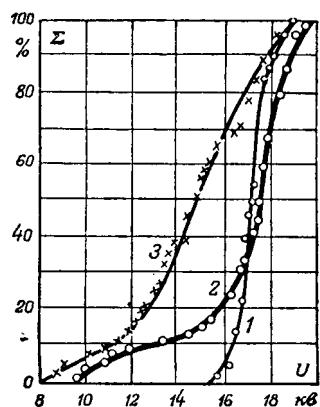


Рис. 2. Результаты определения электрической прочности секций конденсаторов трех партий при постоянном токе.

2—суммарное количество пробитых секций, %, U —напряжение постоянного тока, кв; 1—конденсаторы 1951 г.; 2—то же 1949 г.; 3—то же 1947 г.

ния 1951 г., не бывших в эксплуатации, дало результаты, показанные в таблице.

Результаты определения электрической прочности масла, взятого из конденсаторов

Длительность работы конденсаторов	Пробивная напряженность масла (20° С, 50 Гц), кВ/мм
0	12...20
1 год	10...18,7
2 года	8...16

Данные таблицы показывают, что обусловленное отсыреванием снижение электрической прочности масла не оказалось катастрофическим. Можно полагать, что основной причиной старения исследованных конденсаторов являлось не только отсыревание, а также и какой-то иной процесс. Об этом же позволяют судить и результаты определения пробивного напряжения при постоянном токе для секций из состаренных в эксплуатации и из свежих конденсаторов, представленные в виде кривых распределения пробивного напряжения на рис. 2. В случае свежих конденсаторов разброс пробивных напряжений очень мал (кривая 1), в случае состарившихся конденсаторов разброс сильно увеличен за счет появления образцов с резко пониженней электрической прочностью (кривые 2 и 3); с увеличением продолжительности работы отклонение от исходной кривой разброса усиливается. То обстоятельство, что кривая 2 (1 год эксплуатации) пересекает кривую 1 (свежие конденсаторы) объясняется тем, что кривая 1 получена для конденсаторов, изготовленных из бумаги повышенной плотности, которая обладает повышенной электрической прочностью [Л. 2]. Если бы снижение электрической прочности было обусловлено только увлажнением, то кривые 2 и 3 рис. 2 должны были передвинуться параллельно кривой 1 в сторону пониженных напряжений, чего мы не наблюдаем.

Большой разброс значений тангенса угла потерь, о котором говорилось выше, также под-

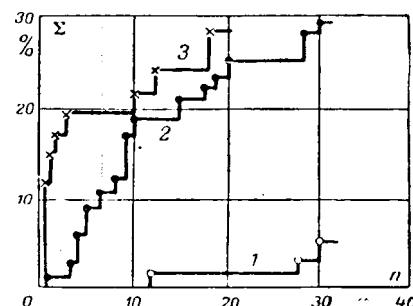


Рис. 3. Зависимость суммарного количества пробитых секций при испытании трех партий конденсаторов от числа кратковременных воздействий по 0,2 сек семикратным рабочим напряжением.

семикратным рабочим напряжением. Σ —суммарное количество пробитых секций в процентах от общего числа испытанных; n —число воздействий повышенным напряжением. 1—конденсаторы 1951 г.; 2—то же 1949 г.; 3—то же 1947 г.

тврждает, что старение различных секций, даже в одном и том же конденсаторе, шло с резко различной скоростью. Это показывает, что проникновение воды внутрь конденсатора не является единственной причиной старения.

Старение приводит не только к ухудшению длительной электрической прочности конденсаторов, но и к ухудшению их кратковременной прочности. На рис. 3 показана зависимость суммарного числа секций, пробитых семикратным синусоидальным напряжением продолжительностью каждого воздействия 0,2 сек. Полученные данные ясно подтверждают, что с увеличением срока пребывания в эксплуатации количество конденсаторов, пробитых при таком испытании, заметно возрастает. Сопоставление значений пробивного напряжения на постоянном токе и угла потерь исследуемых конденсаторных секций показало, что увеличение $\operatorname{tg} \delta$ сопровождается снижением пробивного напряжения (рис. 4).

известного напряжения (рис. 1).

Известно, что одной из основных причин старения бумажно-масляной изоляции при переменном напряжении является развитие ионизации в остаточных газовых включениях, сопровождающееся разложением масла [Л. 3]. Химическую сторону этого процесса можно схематически представить следующим выражением:

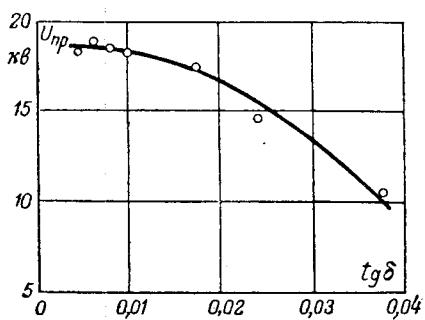
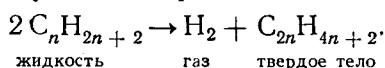


Рис. 4. Зависимость пробивного напряжения секций конденсаторов от величины тангенса угла потерь в них.
 U_{np} — пробивное напряжение постоянного тока, кв; $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла потерь.

Иными словами, при разложении жидких углеводородов масла в электрическом поле под действием ионной бомбардировки наряду с выделением газов (преимущественно водорода) должны идти процессы укрупнения молекул, приводящие к образованию твердого вещества. Последнее известно под названием «кабельного воска» или «Х-воска». Многочисленные случаи образования воска в силовых кабелях с вязкой пропиткой хорошо известны. В литературе можно найти указание о том, что следы воска удалось найти и в пробитых бумажно-масляных конденсаторах [Л. 4].

При размотке секций исследованных конденсаторов, находившихся в эксплуатации 1...2 года и вышедших из строя, было установлено наличие воска, свидетельствующее об интенсивном развитии ионизационных процессов в их диэлектрике. Во многих случаях воск содержался в секции в значительном количестве и препятствовал размотке слипшихся витков; в других случаях содержание воска было незначительным и его трудно было обнаружить невооруженным глазом.

Видимые простым глазом отложения воска представляли собой бесформенные пятна или кольца от светло-желтого до ржаво-красного цвета. Сам воск представляет собой аморфное вещество, не растворимое в обычных органических растворителях и неплавкое. При действии пламени это вещество не горит, но обугливается.

В большинстве размотанных секций основная масса видимых невооруженным глазом отложений воска была сосредоточена в середине ленты и исчезала к ее концам; однако в некоторых секциях видимые места воскообразования располагались по всей длине бумажных лент. Для более детального изучения характера распределения отложений воска в диэлектрике конденсаторов была использована следующая методика. Образцы бумаги, взятые из размотанных секций, промывались бензином, растворяющим масло, но не растворяющим воск. Затем образцы промывались водой и обрабатывались раствором фуксина, который интенсивно окрашивал бумагу в тех мес-

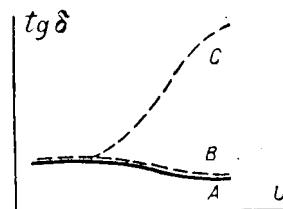


Рис. 6. Зависимость угла потерь образцов бумаги, пропитанной маслом, от напряжения (по данным Скрипкина).

А—образец без масляной прослойки; В—масляная прослойка между слоями бумаги; С—масляная прослойка около электрода.

такс, где не было отложений воска, и места воскообразования ясно выступали на красном фоне.

Интересные результаты были получены при исследовании распределения интенсивности воскообразования по толщине диэлектрика. Для этой цели часть диэлектрика конденсатора, вырезанная из секции, разделялась на отдельные слои (листочки бумаги), которые и окрашивались. После этого для каждого слоя с помощью планиметра определялась суммарная площадь, занятая отложениями воска. Далее строили кривую зависимости значения этой площади для каждого слоя от его порядкового номера, считая от одной из обкладок. Во всех случаях наблюдалось увеличение площади воскообразования в тех слоях бумаги, которые непосредственно прилегают к обкладкам; обычно около одной из обкладок наблюдалось большее выделение воска, чем в другой. Характерные кривые для двух из исследованных секций приведены на рис. 5. Кривая А получена для секции, имевшей $\operatorname{tg} \delta = 0,028$, а кривая В — для секции, имевшей $\operatorname{tg} \delta = 0,018$, т. е. для секций с резко увеличенными потерями.

В работе В. И. Скрипкина по исследованию пробоя бумажно-масляной изоляции с искусственно созданными масляными прослойками [Л. 5] было установлено, что такие прослойки сильнее снижают электрическую прочность, если они непосредственно прилегают к электроду. В этой же работе приведены данные о зависимости угла потерь от напряжения, которые показывают, что при прослойке, отгороженной от электрода слоем бумаги, форма кривой $\operatorname{tg} \delta = f(u)$ остается практически такой же, как и при отсутствии прослоек, в то время как прослойки, прилегающие к электроду, приводят к резкому возрастанию потерь при повышении напряжения (рис. 6). По мнению Скрипкина, прослойка в толще изоляции менее опасна для снижения электрической прочности бумажной изоляции, чем прослойка, прилегающая к электроду, потому, что подвод энергии в первом случае затруднен и может идти только за счет емкостных токов; во втором случае может иметь место непосредственное вырывание электрическим полем электронов из обкладок конденсатора.

Характер кривых на рис. 5 показывает, что наиболее интенсивное развитие ионизационных процессов происходит в зазоре между обкладкой

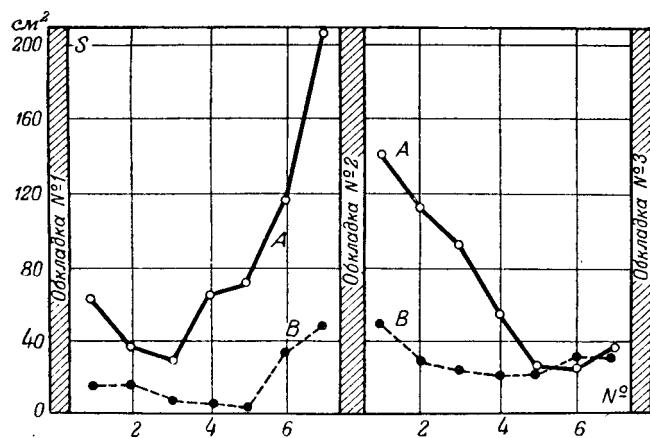


Рис. 5. Изменение площади воскообразования в диэлектрике по слоям бумаги бумажно-масляных конденсаторов, вышедших из строя в процессе эксплуатации.

А—секция конденсатора, имевшая значение $\operatorname{tg} \delta = 0,028$; В—секция конденсатора, имевшая значение $\operatorname{tg} \delta = 0,018$; С—площадь, покрытая воском, cm^2 ; №—номер слоя бумаги.

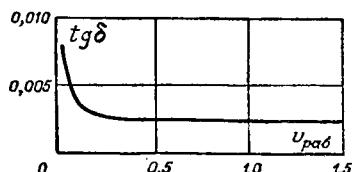


Рис. 7. Зависимость тангенса угла потерь при 60°C и 50 Гц от напряжения для бумажно-масляных конденсаторов изготовления 1951 г., не находившихся в эксплуатации.

и первым слоем бумаги. Можно думать, что именно в этом зазоре начинается развитие этих процессов, которые в дальнейшем распространяются в глубь диэлектрика.

В настоящее время дегазация масла и пропитка бумажных конденсаторов производятся достаточно тщательно, а поэтому в свежих конденсаторах не содержится сколько-нибудь заметного количества остаточных газовых включений. Во всяком случае, судя по имеющимся данным [Л. 6], в доброкачественных конденсаторах даже при значительном превышении напряжения над допускаемым рабочим значением не наблюдается повышения тангенса угла потерь, свидетельствующего о начале заметной ионизации. Полученная нами для свежих конденсаторов кривая $\text{tg } \delta = f(U)$, показанная на рис. 7, подтверждает эти данные. Приходится прийти к выводу о том, что газовые включения возникают в диэлектрике конденсатора во время его работы под напряжением. При воздействии постоянного напряжения возникновение такого рода включений непосредственно у поверхности электродов вполне вероятно, так как оно может быть обусловлено электрохимическими процессами. При этом у отрицательного электрода будет выделяться водород, который особенно неприятен благодаря пониженному значению критического пробивного напряжения.

В литературе [Л. 7] можно найти указание о том, что в изоляции бумажных конденсаторов процессы электрохимического старения могут ити и при переменном напряжении низкой частоты. Может быть такие процессы и являются одной из причин появления газовых включений в зазоре между фольгой и бумагой, откуда и начинает развиваться ионизация.

Исследование окрашенных образцов бумаги из конденсаторов, пробитых в эксплуатации, показало, что воскообразование происходит преимущественно в таких участках диэлектрика, где толщина масляных прослоек между обкладками и бумагой и между слоями бумаги по той или иной причине увеличена. Такими участками являлись слабо сжатые места секций (верхняя часть секции, считая от верхнего бандажа, и нижняя часть, считая от нижнего бандажа); закругленные боковые стенки секций и места расположения мелких складок на бумаге. Обычно выделение воска наблюдается также в районе мест пробоя, хотя часто место пробоя не совмещено с местом наи-

более интенсивного воскообразования. Как правило, воскообразование, наблюдаемое у краев обкладок, имело место не по закраине секции конденсатора, а под обкладками.

Как отмечалось выше, данные рис. 1 были получены для конденсаторов довоенного выпуска. Современные бумажно-масляные конденсаторы, предназначенные для улучшения коэффициента мощности, подвергнуты значительной модернизации, которая заметно улучшила их качество и надежность в работе [Л. 8 и 9]. Можно полагать, что для таких конденсаторов кривая, показанная на рис. 1, уже не является характерной и что среднее значение срока службы их заметно увеличено. Тем не менее и для таких улучшенных конденсаторов могут быть отдельные случаи преждевременных пробоев вследствие развития процесса ионизации даже при номинальном напряжении в конденсаторах, имеющих те или иные дефекты диэлектрика; именно такие конденсаторы и были нами исследованы.

Следует отметить, что некоторые из исследованных образцов могли быть выключены не сразу после пробоя одной из последовательно включенных группы секций, а лишь по истечении некоторого времени. В таких образцах оставшиеся секции работали это время при повышенной рабочей напряженности, что могло послужить причиной резкого увеличения $\text{tg } \delta$ (до 0,030...0,040) и вызвать особенно сильное воскообразование, которое нами и наблюдалось. Тем не менее, даже с учетом высказанных здесь соображений необходимо прийти к выводу о том, что изучение процесса старения бумажно-масляной изоляции в конденсаторах переменного напряжения продолжает оставаться достаточно актуальным и работы по дальнейшему улучшению надежности конденсаторов должны продолжаться.

Литература

1. Б. А. Поляков. Конденсаторные установки для повышения коэффициента мощности. Госэнергоиздат, 1950.
2. В. Т. Ренне. Расчет электрической прочности непропитанной конденсаторной бумаги. Электричество, стр. 16, № 5, 1950.
3. В. Т. Ренне. Старение пропитанной бумажной изоляции. Электричество, № 4, 1952.
4. В. Ф. Конокотин и Б. М. Струнский. Из практики эксплуатации статических конденсаторов. ВЭП, стр. 39, № 12, 1937.
5. В. И. Скрипкин. Влияние масляных прослоек на стабильность кабельной изоляции. Журнал технической физики, т. 7, стр. 727, № 7, 1937.
6. С. К. Медведев. Конструкции конденсаторов с точки зрения повышения надежности в эксплуатации. Материалы совещания по применению статических конденсаторов. Ростов-на-Дону, 1941.
7. Н. Чирг. PIEE, ч. III, № 52, стр. 113, 1951. Электричество, № 1, стр. 86, 1952.
8. М. М. Морозов. Значение статических конденсаторов для улучшения $\cos \varphi$. Промышленная энергетика, № 9, 1949.
9. М. М. Морозов. Современное конденсаторостроение и его ближайшие задачи. Электричество, № 11, 1949.

[26. 11. 1952]

Расчет цепей при периодических разрывных или импульсных напряжениях

Кандидат техн. наук, доц. С. И. КУРЕНЕВ

Ленинград

В любой школе угодно сложной электрической цепи с постоянными средоточенными параметрами как стационарные, так и переходные процессы описываются обычновенными дифференци-

альными уравнениями с постоянными действительными коэффициентами. Если э. д. с. или приложенное к цепи напряжение являются негармоническими периодическими, непрерывными функциями времени, то и принужденные токи и заряды будут также периодическими непрерывными функциями времени. В этом случае для расчета цепей пользуются представлением периодических функций э. д. с. или приложенных напряжений рядами Фурье.

Когда э. д. с. или приложенное к цепи напряжение представляет собой кусочно-непрерывную периодическую функцию времени, подчиняющуюся на периоде условиям Дирихле, то и принужденные токи и заряды, являющиеся частными решениями неоднородных уравнений, справедливыми только для отдельных участков, будут также кусочно-непрерывными периодическими функциями времени. В этом случае решение в форме ряда иногда неприемлемо, так как получающиеся гармонические ряды сходятся медленно или вовсе не сходятся. В статье дан метод определения принужденных токов в ветвях и напряжений на участках линейной цепи, отличный от общепринятого метода рядов Фурье.

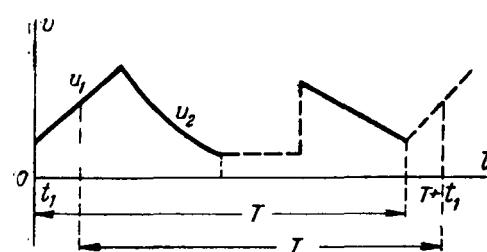


Рис. 1.

Рассмотрим электрическую цепь, содержащую n независимых контуров (рис. 1). Пусть к этой цепи приложено периодически меняющееся напряжение, форма кривой которого может быть разбита на S отдельных отрезков аналитических кривых рис. 1. Условие периодически выражается:

Дается метод определения принужденных токов в ветвях и напряжений на участках линейной цепи в случае питания ее периодическими разрывными или импульсными напряжениями. Метод позволяет выявить особенности в изменении тока или напряжения, чего нельзя достичь при расчете гармоническими рядами, выйду их медленной сходимости.

заряд бой контурные токи, будет:

$$\begin{aligned} Z_{11}q_1 + Z_{12}q_2 + \dots + Z_{1n}q_n &= u, \\ Z_{21}q_1 + Z_{22}q_2 + \dots + Z_{2n}q_n &= 0, \\ \dots & \dots \dots \dots \dots \dots \\ Z_{n1}q_1 + Z_{n2}q_2 + \dots + Z_{nn}q_n &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где $Z_{kh} = L_{kh} \frac{d^2}{dt^2} + r_{kh} \frac{d}{dt} + \frac{1}{C_{kh}}$ — дифференциальный оператор 2-го порядка; $\frac{dq_k}{dt} = i_k$.

Общим решением однородной системы, отвечающей неоднородной системе (1), будет:

$$q_h = \sum_{k=1}^{k=2n} A_k Q_{kh} e^{\delta_k t}, \quad h = 1, 2, \dots, n,$$

где A_k — постоянные, подлежащие в дальнейшем определению;
 $Q_{kh}e^{\delta_k t}$ — одно из частных решений однородной системы для контура h ;
 δ_k — корни уравнения:

Q_{kh} — алгебраические дополнения, полученные из определителя системы (1) после подстановки в нее частных решений.

Неоднородная система (1), в которой правая часть первого уравнения представляет собой кусочно-гладкую периодическую функцию времени,

Для получения нетривиального решения должно быть:

$$\delta^2 + \frac{1}{rc} \delta + \frac{1}{Lc} = 0. \quad (8)$$

Значения U_c и I определяются, если подставить корни уравнения (8) в одно из уравнений (7). Например, путем подстановки корня δ_1 в первое уравнение (7), задавшись $U_{1c} = 1$, получим:

$$I_1 = c\delta_1 + \frac{1}{r};$$

путем подстановки корня δ_2 , задавшись $U_{2c} = 1$, получим:

$$I_2 = c\delta_2 + \frac{1}{r}.$$

Частные решения неоднородной системы (6) определяются обычным способом и будут:

$$u_c = U_{cm} \sin(\omega t - \alpha),$$

$$i = I_m \sin(\omega t - \varphi).$$

Общие решения неоднородной системы (6) будут:

$$\left. \begin{array}{l} u_{1c} = A_1 e^{\delta_1 t} + B_1 e^{\delta_2 t} + U_{cm} \sin(\omega t - \alpha) \\ i_1 = A_1 I_1 e^{\delta_1 t} + B_1 I_2 e^{\delta_2 t} + I_m \sin(\omega t - \varphi) \\ u_{2c} = A_2 e^{\delta_1 \left(t - \frac{T}{2}\right)} + B_2 e^{\delta_2 \left(t - \frac{T}{2}\right)} \\ i_2 = A_2 I_1 e^{\delta_1 \left(t - \frac{T}{2}\right)} + B_2 I_2 e^{\delta_2 \left(t - \frac{T}{2}\right)} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \dots 0 < t < \frac{T}{2}, \\ \dots \frac{T}{2} < t < T. \end{array}$$

Для определения постоянных A_1, A_2, B_1, B_2 , используя гранично-временные условия,

$$u_{1c} \left(\frac{T}{2}\right) = u_{2c} \left(\frac{T}{2}\right), \quad i_1 \left(\frac{T}{2}\right) = i_2 \left(\frac{T}{2}\right)$$

и условия периодичности тока и напряжения на конденсаторе

$$u_{1c}(0) = u_{2c}(T),$$

$$i_1(0) = i_2(T),$$

получим систему уравнений:

$$\left. \begin{array}{l} A_1 e^{\delta_1 \frac{T}{2}} + B_1 e^{\delta_2 \frac{T}{2}} - A_2 - B_2 = -U_{cm} \sin \alpha, \\ A_1 I_1 e^{\delta_1 \frac{T}{2}} + B_1 I_2 e^{\delta_2 \frac{T}{2}} - A_2 I_1 - B_2 I_2 = -I_m \sin \varphi, \\ A_1 + B_1 - A_2 e^{\delta_1 \frac{T}{2}} - B_2 e^{\delta_2 \frac{T}{2}} = U_{cm} \sin \alpha, \\ A_1 I_1 + B_1 I_2 - A_2 I_1 e^{\delta_1 \frac{T}{2}} - B_2 I_2 e^{\delta_2 \frac{T}{2}} = I_m \sin \varphi. \end{array} \right\} \quad (9)$$

Решая систему (9) относительно постоянных, получаем их значения:

$$A_1 = \frac{\left(1 + e^{\frac{\delta_1 T}{2}}\right)(I_2 U_{cm} \sin \alpha - I_m \sin \varphi)}{\left(1 - e^{\delta_1 T}\right)(I_2 - I_1)},$$

$$B_1 = \frac{\left(1 + e^{\frac{\delta_2 T}{2}}\right)(I_m \sin \varphi - I_1 U_{cm} \sin \alpha)}{\left(1 - e^{\delta_2 T}\right)(I_2 - I_1)},$$

$$A_2 = A_1 e^{-\delta_1 \frac{T}{2}}, \quad B_2 = B_1 e^{-\delta_2 \frac{T}{2}}.$$

Если корни комплексные — сопряженные, то имеют место следующие соотношения:

$$\delta_{12} = -\delta \pm j\omega_1,$$

$$\delta_2 = \delta_1, \quad B_1 = A_1, \quad B_2 = A_2, \quad I_2 = I_1.$$

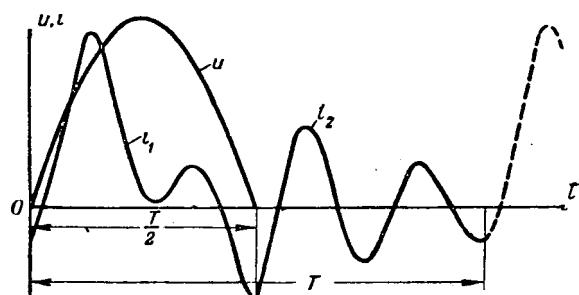


Рис. 3. Ток в индуктивности цепи рис. 2.

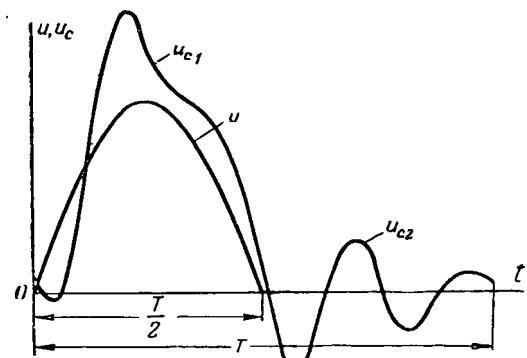


Рис. 4. Напряжение на конденсаторе цепи рис. 2.

В этом случае решения будут:

$$\left. \begin{array}{l} u_{1c} = 2A_1 e^{-\delta t} \cos(\omega_1 t - \varphi_1) + \\ \quad + U_{cm} \sin(\omega t - \alpha) \\ i_1 = 2I_1 A_1 e^{-\delta t} \cos(\omega_1 t - \beta_1) + \\ \quad + I_m \sin(\omega t - \varphi) \end{array} \right\} \dots 0 < t < \frac{T}{2},$$

$$\left. \begin{array}{l} u_{2c} = 2A_2 e^{-\delta \left(t - \frac{T}{2}\right)} \cos \times \\ \quad \times \left[\omega_1 \left(t - \frac{T}{2}\right) - \beta_2 \right] \\ i_2 = 2A_2 I_1 e^{-\delta \left(t - \frac{T}{2}\right)} \cos \times \\ \quad \times \left[\omega_1 \left(t - \frac{T}{2}\right) - \beta_2 \right] \end{array} \right\} \dots \frac{T}{2} < t < T.$$

На рис. 3 приведены кривые тока в катушке, построенные для $\omega_1 = 4\omega$, $\frac{1}{\delta} = 0,4 T$. На рис. 4 приведены кривые напряжения на конденсаторе.

Пример 2. Цепь содержит в последовательном соединении $r = 10 \text{ ом}$ и $C = 500 \text{ мкФ}$ (рис. 5). К цепи приложено заданное напряжение:

$$u = \begin{cases} 1) 5000t & 0 < t < 0,01; \\ 2) -100 \sin 157(t - 0,01) & 0,01 < t < 0,03; \\ 3) 50 - 5000(t - 0,03) & 0,03 < t < 0,04 = T. \end{cases}$$

Закон изменения напряжения повторяется. Период равен 0,04 сек.

Дифференциальные уравнения для различных участков:

$$1) \frac{dq_1}{dt} + 200q_1 = 500t \dots 0 < t < 0,01;$$

$$2) \frac{dq_2}{dt} + 200q_2 = -10 \sin 157(t - 0,01) \dots 0,01 < t < 0,03;$$

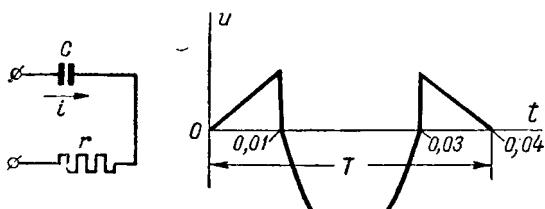


Рис. 5. Питание цепи разрывным периодическим напряжением.

$$3) \frac{dq_3}{dt} + 200q_3 = 5 - 500(t - 0,03) \dots 0,03 < t < 0,04 = T.$$

Решения этих уравнений будут:

$$1) q_1 = A_1 e^{-200t} + 2,5t - 0,0125 \dots 0 < t < 0,01;$$

$$2) q_2 = A_2 e^{-200(t - 0,01)} - 0,039 \sin [157(t - 0,01) - 38^\circ 10'] \dots 0,01 < t < 0,03;$$

$$3) q_3 = A_3 e^{-200(t - 0,03)} - 2,5t + 0,0375 \dots 0,03 < t < 0,04 = T.$$

Постоянные интегрирования определяются из условий:

$$1) q_1 = q_2 \text{ при } t = 0,01;$$

$$2) q_2 = q_3 \text{ при } t = 0,03;$$

$$3) q_1(0) = q_3(T),$$

которые дадут:

$$\left. \begin{aligned} A_1 - 0,135 A_3 &= 0,025, \\ 0,135 A_1 - A_2 &= 0,0115, \\ 0,0183 A_2 - A_3 &= 0,0615. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Решая систему (10), получим значения постоянных:

$$A_1 = 0,017, \quad A_2 = -0,009, \quad A_3 = 0,061.$$

Окончательные решения для напряжений на конденсаторе будут:

$$1) u_{1c} = 32 e^{-200t} + 5000t - 25 \dots 0 < t < 0,01;$$

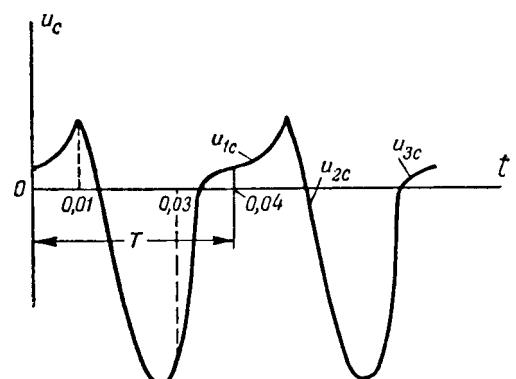


Рис. 6. Напряжение на конденсаторе цепи рис. 5..

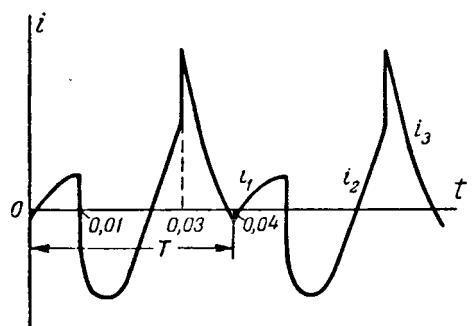


Рис. 7. Ток в цепи рис. 5.

$$2) u_{2c} = -18 e^{-200(t - 0,01)} - 78 \sin [157(t - 0,01) - 38^\circ 10'] \dots 0,01 < t < 0,03;$$

$$3) u_{3c} = 122 e^{-200(t - 0,03)} - 5000t + 225 \dots 0,03 < t < 0,04 = T$$

и для тока в цепи:

$$1) i_1 = -32 e^{-200t} + 2,5 \dots 0 < t < 0,01;$$

$$2) i_2 = 1,8 e^{-200(t - 0,01)} - 6,1 \sin [157(t - 0,01) + 51^\circ 50'] \dots 0,01 < t < 0,03;$$

$$3) i_3 = 12,2 e^{-200(t - 0,03)} - 2,5 \dots 0,03 < t < 0,04 = T.$$

На рис. 6 приведены кривые изменения напряжения на конденсаторе, на рис. 7 — кривые изменения тока цепи.

Рассмотренные примеры позволяют высказать мнение, что при пользовании рядом Фурье вряд ли было бы возможно уловить все особенности изменения тока в цепи и напряжения на конденсаторе при действии на цепь разрывного напряжения.

[16. 6. 1952]

◆ ◆ ◆

Из истории электротехники

Уильям Гильберт

К 350-летию со дня смерти

10 декабря 1603 г. в Лондоне умер в 60-летнем возрасте Уильям Гильберт (William Gilbert), автор открывшего эпоху в истории физики сочинения «О магните, магнитных телах и о большом магните — Земле» (*De magnete, magneticisque corporibus et de magnete Tellure*).

Гильберт родился 24 мая 1540 г.¹ в Колчестере. Он учился в Кэмбриджском университете. Вскоре по окончании университета он был удостоен первой ученой степени, а затем, не имея еще 30 лет от роду, — высшей ученой степени.

В 1573 г. Гильберт переехал в Лондон; там он занимался медициной, был членом Коллегии врачей, а впоследствии в 1599 г. или 1600 г. возглавил Коллегию, став ее президентом. Выдающиеся практические способности врача, широкие познания в науках, известность, приобретенная многими опытами и теоретическими выводами из них, авторитет, завоеванный среди коллег и в мире ученых, обратили внимание королевского двора на Гильберта и он стал врачом английской королевы Елизаветы.

Для учения о магнетизме и электричестве Гильберт был тем, кем его знаменитый современник Галилео Галилей был для механики. Галилей высоко оценил вклад Гильберта в науку. В своем сочинении «Диалог» (1632 г.) Галилей записал: «Воздаю хвалу, дивлюсь, завидую Гильберту. Он развил достойные удивления идеи о предмете, о котором трактовало столько гениальных людей, но который ни одним из них не был изучен внимательно». Дальше Галилей добавил: «Гильберту недостает только побольше математики и особенно геометрии. Большее знакомство с нею не позволило бы ему так решительно признавать доказательством те основания, которые он приводит как причину фактов, им правильно наблюдавшихся».

Роль Гильберта в приумножении познаний человека о магните, в открытии новых явлений, получивших из уст Гильберта название электрических, трудно переоценить.

Что было известно в этой области до Гильберта? Ограничимся краткой выборочной справкой. Известно, что в сочинении Аристотеля «О душе» (кн. I, гл. 2) имеется упоминание о том, что греческий мудрец Фалес (590 г. до н. э.) знал свойство камня — магнита притягивать железо, а также свойство янтаря после натирания притягивать легкие предметы. Римский врач Скрибоний применял (48 г. н. э.) к лечению подагры способность некоторых рыб (электрического угря) причинять странной природы удар (электрический разряд) (*Scrib., Larg. Compositioes*, Leipzig,

1887, стр. 9). Китайский ученый Сю-Цин указывал (121 г.) в своем словаре «Шо-вэнь», что «магнит — название камня, который может дать направление» (A. Wittstein, Klaproth-Schreiben am Umbold, Leipzig, 1885, стр. 2—3); это понималось так, что Сю-Цин подразумевал иглу, которой дано направление, т. е. нечто вроде указателя стран света. Александр Некэм (Нескем, Англия) в своем труде «О природе вещей» (*De naturis rerum*, 1195, гл. 98, стр. 183) упоминал, что сталь можно намагнитить. Фракасторо впервые рассуждает о магнитном полюсе Земли, предполагая, что полюс заключается в горе на Севере (*Girolamo Fracastoro, De Sympatia*, 1574, кн. 1, гл. 7, стр. 63). Гартманн (*Georg Hartmann*) в письме к герцогу Альбрехту Прусскому 4 марта 1544 г. сообщал, по своим наблюдениям, что северный конец магнитной стрелки наклоняется вниз (Почтово-телеграфный журнал, 1892, стр. 914). Впервые о двух магнитных полюсах Земли упоминал в 1588 г. Ливио Сануто (*Livio Sanuto*) (*Darmstädter Handbuch zur Geschichte der Naturwissenschaften und der Technik*, Berlin, 1908). Наконец, современник Гильберта Джиамбаттиста делла Порта (1541—1615), изучая свойства магнита, высмеивал связанные с представлениями о магните мистические предрассудки древних; в написанной им работе «Натуральная магия» (1589) Порта сообщил о выполненных им опытах с магнитом.

И вот в 1600 г. появилось сочинение Гильберта. В нем автор тщательно воспроизвел все, что ему было известно о магнетизме, описал выполненные им опыты и изложил собственную теорию земного магнетизма. Сочинение Гильберта состоит из шести книг. Первая и вторая книги посвящены изложению известных в его годы из древних и более поздних сочинений сведений о магните, причем во второй книге Гильберт, специально останавливаясь на разборе явлений «притяжения», высказывает во второй главе ряд соображений, которые можно рассматривать как начало исследований по электричеству. В третьей книге рассматриваются вопросы «направления», в четвертой — вопросы «склонения», в пятой — «наклонения». В шестой книге Земля рассматривается как большой магнит.

В первой книге Гильберт указал на следующие свойства, присущие магнитам (гл. 3, 4, 5, 12, 13): 1) разная притягательная сила в разных точках магнита, с наибольшей на полюсах; 2) наличие отличающихся своим качеством двух полюсов; 3) притягивание разноименных полюсов (назначения полюсов — северный и южный — ввел в 1544 г. Гартманн) и отталкивание одноименных полюсов; 4) определенная ориентация

¹ В некоторых работах о Гильберте указан 1544 г.

свободно подвешенного или плавающего магнита в пространстве, позволяющая находить север и юг; 5) невозможность получения магнита с одним полюсом, о каком бы мелком осколке ни шла речь.

В гл. 17 первой книги рассматривается Земной шар как большой магнит; этой теме посвящена особо книга шестая.

Для усиления действия естественных магнитов Гильберт предложил стальную арматуру (вторая книга, гл. 19). Касаясь формы магнитов, Гильберт указал, что от нее зависят качества магнитов (вторая книга, гл. 31—32).

Гильберт много и плодотворно экспериментировал. Нельзя сомневаться, что Гильберт, высокоДобразованный и эрудированный исследователь и писатель, знал, какое значение придавали эксперименту его великие предшественники. Леонардо да Винчи (1452—1510) говорил: «Опыт никогда не обманывает», «Не слушай учения тех мыслителей, доводы которых не подтверждаются опытом». «Кто требует, чтобы опыт дал то, что он дать не может, тот удаляется от разума» (Г. Сейаль. Леонардо да Винчи как художник и учений. СПБ, 1898, стр. 116 и пр.). И Гильберт строго стоял на этих позициях. Он не считал возможным ограничиваться формальным описанием одних фактов. Экспериментируя, он стремился: анализировать наблюдаемые явления и данные опыта, подмечать сходство и различия свойств и, уважая научное наследство, оставшееся от предшественников и древних, критически его осваивать, решительно и со всей строгостью отвергая ложное. В предисловии к своему труду о магнетизме он отметил: «в наше время открыто и извлечено на свет много такого, что охотно было бы воспринято и ими (Аристотелем, Птоломеем, Галеном и др.), если бы они были живы». Там же Гильбертом сказано: «В открытии тайн и исследовании скрытых причин вещей от точных опытов и доказанных положений получаются более прочные выводы, нежели от шаблонных догадок и мнений косных философов». Резкой критике Гильберт подверг многие высказывания Дж. Порты, а также авторов ряда работ в области естествознания. Правда, ему самому не удалось избежать многих ошибок в постановке или оценке опытов, ряд его утверждений оказался ошибочным и был отвергнут наукой при ее последующем развитии. Но толчок, сделанный Гильбертом в разработке вопросов магнетизма и его роль в открытии нового явления — электричества — от этого нисколько не умаляются.

Проверив и установив, что притяжение после натирания свойственно не только янтарю, но и целому ряду других тел (сапфиру, опалу, алмазу, хрусталю, сланцам, сере и т. д., всего более двадцати), Гильберт прозвал их по аналогии с янтарем электрическими (янтарь по гречески *γλεύτρον* электрон). Эти опыты натолкнули Гильберта на мысль, что между «магнитной силой» и «электрической силой» имеется принципиальное различие, свидетельствующее о разной природе явлений. Он решил, что открытая им «электрическая сила» проявляется в свойстве наэлектризованных

тел (не магнитов) притягивать в результате трения легкие кусочки почти всех твердых тел, а не только железо, как магниты. По Гильберту все тела делятся по своей природе на «электрические» и «неэлектрические»; «электрические тела» якобы содержат особые влажные соки; «электрическая жидкость» способна испаряться и эти испарения служат средством передачи воздействия «электрических тел». Для демонстрации притяжения легких предметов самыми слабыми «электрическими испарениями» Гильберт построил по сути дела, первый электроскоп. Металлическую стрелку он укрепил на острие подставки так, что стрелка могла легко поворачиваться на этом острие. Когда он приближал к концу стрелки натертное «электрическое тело», стрелка, устремляясь к «электрическому телу», поворачивалась в соответствующую сторону. «Электрическая жидкость» рисовалась Гильберту как «весома разреженная, гораздо тоньше окружающего воздуха».

Уместно напомнить, и нужно думать, что Гильберту это было известно, что Лукреций (римский поэт — эпикуреец, 99—55 г. до н. э., автор «De rerum natura» — О природе вещей, ОГИЗ, 1933) истечением (отделением) материальных частиц объяснял притяжение магнитов (стр. 179—183).

Исследуя магнитные и электрические проявления, Гильберт пришел к заключению: а) что электрические свойства возбуждаются трением, а магнитные свойства принадлежат телам по природе; б) что магнитные действия проявляются как в притяжениях, так и в отталкиваниях, а электрические — только в притяжениях; в) что электрическую силу можно уничтожить влажностью, а магнитную — невозможно. Магнетизм, по мнению Гильберта, есть некая начальная сила, исходящая из тел, а электризация есть выжимание из пор «истечений» посредством трения. Необходимость трения, говорил Гильберт, вызывается скрытой, загадочной природой электричества, «силы» которой «скрыта и как бы заключена в темнице».

В раскрытии природы большого магнита — Земли — Гильберт видел путь к расширению познаний человека об основах мироздания. В электричестве — полагал Гильберт — таятся силы, которым земной шар обязан своим внутренним единением, материальным сцеплением. Вращение же Земли — утверждал Гильберт — происходит под действием магнитной силы. Вращение Луны вокруг Земли он объяснял взаимным действием магнитной силы Земли и магнитной силы Луны. В изданной уже после смерти Гильберта его книге «О нашем мире» (De Mondo nostro) это уточняется так: «До Земли достигают излитые Луной силы и действуют на жидкое тело. В свою очередь магнитные силы Земли обливают Луну; обе соединяются во взаимодействии и согласуются в пропорции и соответствии движения, но преобладает Земля, преодолевая массою». Интересно, что во многом аналогичная схема заключалась в сформулированном спустя несколько десятилетий Ньютона законе всемирного тяготения.

Сочинения Гильберта долгое время пользовались широким признанием и распространением. Изданная в 1600 г. на латинском языке книга «De magnetе...» в дальнейшем была переведена на английский и другие языки. Впервые в истории учения об электричестве и магнетизме в книге Гильберта была сделана попытка изложить в сводном виде теорию.

Может возникнуть вопрос, почему Гильберт — врач по профессии посвятил данным вопросам большую часть своего времени и сил. Конечно, огромное значение имело его личное творческое устремление как мыслителя и экспериментатора к этой области изучения природы. Но вместе с тем нельзя упускать из виду значительного влияния в этом направлении окружавшей Гильберта обстановки. Он жил и творил в эпоху борьбы Англии за господство на море, за захват колоний во всех частях света. Англо-испанская война, англо-французская война, рост военного и торгового флота предъявляли науке определенные требования для обеспечения надежного мореплавания. Ориентация по звездам в условиях непогоды, туманов была невозможна; потребность в хороших компасах давно назрела и естественно, что проблеме научно-обоснованного использования с практическими целями магнитных явлений уделялось в связи с этим пристальное внимание. Гильберт по своему положению в обществе, в научной среде не мог быть неосведомлен обо всем этом; он был в курсе научно-технических вопросов, занимавших тогда передовых людей науки и техники, и был, конечно, в курсе проблемы компасного дела.

Опыты Гильберта и его рассуждения о магнитных явлениях были известны ученым в разных странах мира. Наибольшее же внимание с их стороны было проявлено к высказанной Гильбертом

идее о «новой силе» — об электричестве. Они привлекли вскоре наиболее многочисленных подражателей. Гильберт натолкнул своих современников, своих последователей на опыты с наэлектризованными телами, и интерес, возникший благодаря Гильберту к этой стороне явлений природы, открыл ту тропинку в истории учения об электричестве, которая позднее, невзирая на всякие препятствия, уклоны, срывы и разочарования, постигавшие не одну теорию и ее приверженцев, вывела в конце концов это учение на широкую и славную дорогу фундаментальной науки об электричестве.

Конечно, во взглядах Гильберта, не говоря даже о чисто философской их стороне, было немало ложного и по сути наивного. Но нельзя забывать, что формировались эти взгляды более чем три с половиной века назад. Известно, например, что его утверждение о совпадении магнитного и астрономического (географического) полюсов не соответствует действительности; что в связи с этим его высказывания, связанные с явлениями склонения и наклонения магнитной стрелки, были ошибочными; что убеждение его в том, что электрической силе, возбужденной трением, свойственно только притяжение, а отталкивание невозможно, было плодом заблуждения и пр.

Повторяя, все это не умаляет выдающейся роли Уильяма Гильберта в истории учения об электричестве и магнетизме.

В ознаменование выдающегося значения Гильберта для науки и для электротехники именем Гильберта названа единица гб намагничивающей силы и разности магнитных потенциалов в абсолютной электромагнитной системе единиц СГС.

Д. Р.



Первая русская установка трехфазного тока¹ (Новороссийская электростанция)

Несмотря на успех, который имели построенные в 1891 г. М. О. Доливо-Добровольским электростанция трехфазного тока в Лауфене и линия электропередачи Лауфен — Франкфурт на Майне, борьба между сторонниками постоянного и переменного токов продолжалась. Почти все вновь сооружаемые электрические станции продолжали строиться с применением постоянного тока. Так, например, в Германии в 1895 г. из общего количества 148 электростанций общественного пользования только на 8 был применен трехфазный ток. В России из 25 электростанций общественного пользования, построенных до 1900 г., только на 9 был трехфазный ток; причем из этих 9 станций на 6 электростанциях трехфазный ток

вырабатывался при наличии на них установок постоянного тока или сдвоенного переменного тока. Это положение сохранилось до самой Октябрьской революции и в первые годы после нее. Так, согласно статистическим данным, опубликованным Главэлектро ВСНХ на 1 января 1922 г., из общего количества 810 электростанций общественного пользования на 706 электростанциях был постоянный ток, 19 электростанциях был однофазный ток, 58 электростанциях был трехфазный ток, 27 электростанциях была смешанная система тока.

О времени сооружения в России первой электростанции трехфазного тока до сих пор в литературе существуют разноречивые сведения. Почти во всех книгах и статьях, посвященных вопросу внедрения трехфазного тока в России, сообщается, например, что первая электростанция трехфазного тока была построена Р. Э. Классо-

¹ Доклад на тему настоящей статьи был сделан автором на Совещании по истории техники, проведенном Комиссией по истории техники ОТН АН СССР в мае 1952 г.

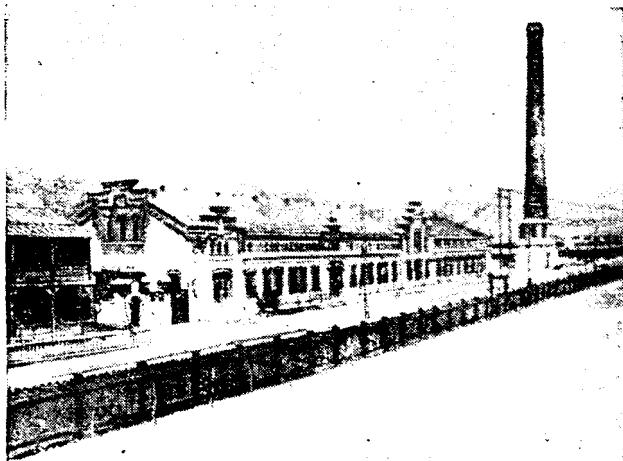


Рис. 1. Новороссийская электростанция, общий вид.

ном и В. Н. Чиколевым в 1896 г. на Охтенском пороховом заводе в Петербурге (два трехфазных генератора 175 и 120 квт).

Однако в № 3 журнала «Электричество» за 1895 г. мы находим заметки, из которых следует, что на установленных на пряжекрасильной фабрике т-ва Франц Рабенек, близ станции Мытищи, двух динамомашинах постоянного тока 54 и 27 квт, кроме обыкновенных коллекторов, имелось по три кольца «для получения трехфазного тока для шести моторов с вращающимся магнитным полем». Кроме того, в том же номере журнала указано, что приведение в действие подъемных машин и норий Московского зернохранилища Московско-Казанской железной дороги осуществляется 10 двигателями «с вращающимся магнитным полем по 6 действительных лошадиных сил каждый». Для питания этих электродвигателей были установлены два генератора трехфазного тока по 72 квт. Таким образом, приоритет установки на Охтенском заводе не подтверждается.

Дальнейшие изыскания по данному вопросу показали, что первая в России и в мире электростанция трехфазного тока, предназначенная для снабжения промышленного предприятия, была построена в Новороссийске инженером путей сообщения Александром Николаевичем Щенсновичем в 1893 г.

По поводу электрической станции в Новороссийске имеется упоминание в докладе П. П. Дмитриенко на совместном заседании VI и VIII отделов Русского технического общества 26 ноября 1903 г. П. П. Дмитриенко полагал, что Новороссийская электростанция дала трехфазный ток годом раньше установки М. О. Доливо-Добровольского на выставке 1891 г., т. е. в 1890 г. Но как мы покажем далее, это было заблуждением со стороны докладчика.

В бюллетенях комиссии международного конгресса железных дорог за июнь 1897 г., т. XI, № 7, издаваемых в Брюсселе, в статье «Зернохранилища, элеватор и электрическая станция Новороссийского порта» приведены следующие данные по

оборудованию электрической станции Новороссийского элеватора: «Всего на центральной станции установлены четыре паровые двигатели по 250 л. с. каждый, соединенные с генераторами трехфазного тока, делающие 125 об/мин... Трехфазные двигатели с числом оборотов 500 в мин. установлены в количестве 83 штук мощностью 5, 10 и 20 л. с.». В этой статье указано, что элеватор строился между апрелем 1891 г. и октябрем 1894 г.

В книге «Портовые устройства Общества Владикавказской железной дороги и обзор коммерческой деятельности дороги в Новороссийске» сказано:

«...В период времени с апреля 1891 г. по октябрь 1894 г. сооружен большой силосный амбар — элеватор на 3 000 000 пудов... Одновременно с большим силосным и малым амбарным элеваторами была построена центральная электрическая станция, откуда ток... передавался электродвигателям... Всего на центральной станции установлено 4 паровые машины по 250 сил каждая, соединенные с динамо-генераторами трехфазного тока для 125 об/мин. Всех динамо-моторов трехфазных для 500 оборотов установлено 83 шт. силою в 5, 10 и 20 пар лошадей».

Из приведенных сообщений следует, что электрическая станция Новороссийского элеватора строилась с 1891 г. и могла быть окончена строительством в 1893 или 1894 г. Чтобы уточнить срок окончания строительства Новороссийской электростанции, обратимся к официальным бухгалтерским отчетам Владикавказской железной дороги, которые ежегодно представлялись в Министерство путей сообщения и другие министерства. В этих отчетах по дебету имеется статья «Устройство элеватора и прочих приспособлений на ст. Новороссийск». Затраты на строительство составляли по годам:

1891 г.	184 164 руб.
1892 г.	1 382 952 руб.
1893 г.	1 138 184 руб.
1894 г.	276 856 руб.
1895 г.	2 116 руб.

Из этих цифр, характеризующих затраты на строительство элеватора и электростанции, можно совершенно определенно указать, что годом окончания строительства электростанций следует считать 1893 г. Затраты 176 856 в 1894 г. пошли на небольшие доделки и окончание переоборудования старых зерновых амбаров, где также была произведена механизация выгрузки зерна из вагонов и нагружки судов.

Из статьи А. Абрамовича, помещенной в журнале «Инженер» за 1892 г., видно, что первоначально электрическую станцию в Новороссийске предполагалось оборудовать на постоянном токе. Инженер А. Н. Щенснович, самостоятельно спроектировавший не только здание элеватора, но также и электрическую станцию для этого элеватора, в связи с опубликованными как раз в то время результатами эксплуатации трехфазной установки М. О. Доливо-Добровольского в Лауффен-Франкфурте, принял решение строить в Новороссийске

российское электрическую станцию не постоянного тока, а переменного трехфазного, и это свое намерение он блестяще осуществил.

Оборудование Новороссийской электрической станции. Здание электрической станции, построенное в 1893 г., расположено на территории порта железнодорожной станции Новороссийск Владикавказской железной дороги. В одноэтажном двухсветном помещении станции расположены: котельная, машинный зал и мастерская. Котельная расположена в одном из торцевых помещений и в ней установлены шесть паровых котлов системы Шухова, расположенных в один ряд. Отопление котлов — нефтяное. Поверхность нагрева каждого котла — около 80 м^2 , давление пара 10 ат.

В машинном зале установлены четыре паровые машины компаунд завода Бейхельта мощностью 250 л. с., 125 об/мин.

У цилиндров высокого давления имелось клапанное парораспределение системы Кольмана, а у цилиндров низкого давления — золотниковое парораспределение системы Мейера с ручным регулированием. Для каждого из двух паровых машин был установлен общий струйный конденсатор, где конденсация пара осуществлялась путем вспрыскивания морской воды.

На одном валу с паровыми машинами установлены четыре трехфазных генератора мощностью по 300 ква каждый, 250 в, 700 а, 25 гц, 125 об/мин с независимым возбуждением.

Для возбуждения трехфазных генераторов были установлены две машины постоянного тока мощностью 16,7 квт каждая, 800 об/мин 110 в, 150 а, изготовленных на заводе Эрликон.

Эти машины приводились во вращение от валов паровых машин посредством ременной передачи. Кроме того, в машинном зале был установлен третий возбудитель с отдельной паровой машиной.

Распределительное устройство было смонтировано на щите из 11 панелей, от него отходили 12 линий для питания электродвигателей, установленных в элеваторе, и восьми хлебных амбаров. Все четыре трехфазных генератора могли работать параллельно. Синхронизация осуществлялась при помощи ламповых указателей. Электропроводка на территории хлебных амбаров была воздушной на фарфоровых изоляторах. Привод отдельных механизмов и транспортеров элеватора осуществлялся при помощи трехфазных асинхронных электродвигателей, снабженных редукторными шестеренными передачами, с чугунными коробками, наполненными салом.

В архивах Министерства путей сообщения сохранились фотографии внешнего вида электростанции, ее машинного зала и мастерской, в которой изготавливались А. Н. Щенсновичем трехфазные генераторы и электродвигатели, причем эти электрические машины запечатлены на фотографиях в стадии их изготовления. Возникает вопрос, по каким чертежам и расчетам изготавливались в Новороссийске трехфазные генераторы и электродвигатели. По сообщению П. П. Дмитри-

енко и В. Ф. Аксенова они строились по чертежам фирмы Броун-Бовери. По сообщению В. Ф. Аксенова механическая обработка деталей электрических генераторов и электродвигателей производилась в Новороссийских железнодорожных мастерских. Изготовление обмоток и сборка машин делались в мастерской, находящейся при Новороссийской электрической станции. Чтобы достойно оценить замечательную работу А. Н. Щенсновича как строителя первой в России и в мире промышленной электростанции трехфазного тока мощностью 1200 ква, следует учесть, что мощность Лауффенской электростанции составляла 230 квт, а электростанции Охтенского портowego завода 270 квт.

На Новороссийской станции была достигнута параллельная работа четырех генераторов, соединенных с поршневыми двигателями, на Лауффенской же станции стоял только один агрегат, а на Охтенской — два агрегата, приводимых в движение от водяных турбин при помощи ременного привода.

В дальнейшем, приблизительно в 1900 г., вследствие роста нагрузки станции за счет установки новых механизмов и расширения складских помещений электростанция была расширена.

Личного дела Александра Николаевича Щенсновича разыскать не удалось. В архиве Министерства путей сообщения было обнаружено дело чиновника Николая Яковлевича Щенсновича, отца Александра Николаевича. Н. Я. Щенснович родился в 1829 г. и умер в 1894 г. Происходил он из дворян Смоленской губернии. Служил в Гродно и был под судом за хранение прокламаций, предназначавшихся для распространения среди крестьян. В дальнейшем он работал в Управлении Закавказской железной дороги в должности управляющего делами дороги.

Александр Николаевич Щенснович значится в списке окончивших Петербургский институт путей сообщения в 1875 г. Имеются сведения, что А. Н. Щенснович в 1917 г. был командирован на Дальний Восток для приемки паровозов, заказанных для Владикавказской железной дороги. В это

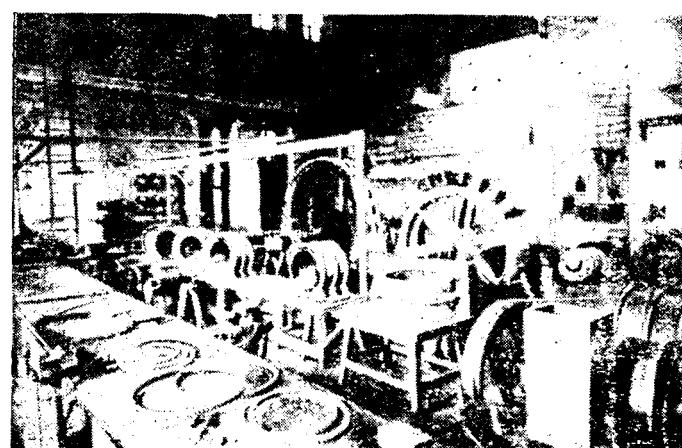


Рис. 2. Вид мастерской Новороссийской электростанции. Трехфазный генератор 300 ква, 125 об/мин и асинхронные электродвигатели в стадии изготовления.

время А. Н. Щенсновичу было 65 лет. Дальнейшая судьба А. Н. Щенсновича неизвестна.

Чтобы судить о том, насколько передовой в техническом отношении являлась Новороссийская электростанция, ниже приводится список электростанций трехфазного тока, построенных за период с 1891 по 1894 г. включительно.

Список электростанций трехфазного тока, построенных в 1891—1894 гг.

1. Первая электростанция трехфазного тока была построена М. О. Доливо-Добровольским в 1891 г. в Лауфене. На ней был установлен один генератор мощностью 230 ква, 150 об/мин, 95 в, 40 гц с приводом от водяной турбины. В 1892 г. на Лауфенской станции был установлен второй аналогичный агрегат; эта электростанция была использована для освещения в Гейльброне.

2. Первая электростанция трехфазного тока, пред назначенная для снабжения промышленного предприятия, была построена А. Н. Щенсновичем в 1893 г. в Новороссийске. На станции были установлены четыре параллельно работающих генератора общей мощностью 1 200 ква.

3. В 1893 г. завод Эрликон построил две электростанции в Вюргеме в Вюртенберге. На одной из этих станций

был установлен трехфазный генератор мощностью 140 квт, а на второй 70 квт.

4. В 1893 г. была построена Бюккенгеймская центральная электростанция, на которой были установлены два трехфазных генератора по 130 квт каждый. Трехфазный ток напряжением 700 в передавался на расстояние 1,2 км и преобразовывался в постоянный ток при помощи мотор-генератора. Постоянный ток поступал в распределительную сеть для целей освещения и питания 15 электродвигателей.

В заключение следует отметить, что А. Н. Щенснович не только спроектировал и построил мощную электростанцию трехфазного тока, но и организовал на месте изготовление четырех тихоходных трехфазных генераторов по 300 ква каждый, а также около 100 электродвигателей.

Имя Александра Николаевича Щенсновича должно быть известно широкой технической общественности.

Инж. С. А. ГУСЕВ
Московский энергетический институт
им. Молотова



Из воспоминаний инженера Новороссийской электростанции

На электростанцию при Новороссийском элеваторе я впервые попал, когда проходил там практику в 1911 г., в течение 3 мес. Затем с 1922 по 1931 г. я работал на ней в должности сперва помощника начальника электроцеха и с 1927 г.— начальником электроцеха.

В 1911 г. электростанция занимала одноэтажное кирпичное здание площадью примерно около 3 000 м² с подразделением на машинный зал, котельное отделение и мастерские. В то время на этой электростанции было установлено шесть паровых машин общей мощностью 2 000 л. с., из них две вертикальных по 500 л. с., 125 оборотов и четыре горизонтальных по 250 л. с. и 125 оборотов каждая.

Паровая машина 500 л. с. вращала два генератора трехфазного переменного тока, сидящих на одном валу (по обоим концам вала) с паровой машиной. Эти трехфазные генераторы были однотипными с генераторами, установленными у горизонтальных паровых машин. Каждая паровая машина в 250 л. с. вращала один генератор трехфазного переменного тока, сидящий на одном валу с машиной. Таким образом, всего было установлено восемь генераторов трехфазного тока 250 в, 600 а, 25 пер/сек, 125 оборотов. Все генераторы работали параллельно на общие шины распределительного щита. Распределительный щит, на котором сосредоточивалась и распределялась по отдельным потребителям электроэнергия, вырабатываемая станцией, состоял из 16 мраморных панелей. Из них: восемь панелей генераторных, шесть питающих линий и две резервных.

В котельном отделении было установлено девять паровых горизонтальных котлов паровозного типа на 12 ат давления пара с поверхностью на-

грева каждого котла 120 м². Котлы с форсунками системы инж. А. Н. Щенсновича работали на нефти. Продукты сгорания отводились в общий подземный дымоход, соединенный с кирпичной трубой высотой около 70 м и расположенной от котельного отделения на расстоянии 30...35 м.

Эта установка работала исключительно для силовой и осветительной нагрузки элеватора, межскладов, галлерей и подсобных помещений элеватора, на сторону электроэнергия не отпускалась. Силовая нагрузка составляла примерно 88% и осветительная 12% от общей установленной мощности. Характер нагрузки в основном зависел от подачи вагонов с зерном к элеватору и от количества гружающихся зерном пароходов. В большинстве случаев работа протекала равномерно с участием в одновременной работе от четырех до семи генераторов. Иногда при более интенсивной работе участвовали все восемь генераторов.

Коэффициент мощности станции был очень низок — 0,35 ... 0,5. Объяснялось это неравномерной нагрузкой механизмов элеватора: неравномерная или недостаточная сыпь зерна на ленточные транспортеры, холостые пробеги транспортеров, разновидность зерна (легкое, тяжелое); кроме того, сказывалось влияние ненормально больших воздушных зазоров электродвигателей.

На каждом электродвигателе была прикреплена медная табличка с указанием мощности в лошадиных силах, порядкового номера двигателя и сокращенного наименования Владикавказской железной дороги, например: «Влк. ж. д. 20 Н. Р., № 1». По мощности электродвигатели разделялись на 20 л. с.—12 шт., 10 л. с.—около 160 шт., 5 л. с.—около 40 шт., 2 л. с.—около 15 шт., 1 л. с.—около 15 шт. (количество указано с резервом).

Все электродвигатели открытого и незазищенного типа с короткозамкнутым ротором, с подшипниками скользящего трения и кольцевой смазкой. Роторы с двумя свободными концами вала для насадки шестерни или шкива. Сердечники статора мощностью 20 и 10 л. с. состояли из штампованных листов толщиной примерно 0,2 мм с бумажной изоляцией и закрытыми пазами, набранных и спрессованных в станине, состоящей из двух чугунных половин, стянутых болтами.

В двигателях мощностью 5—2—1 л. с. листы статора спрессованы в неразъемных чугунных станинах. Ротор состоял из штампованных листов с круглыми закрытыми пазами. Листы ротора набраны на чугунную крестовину и удерживались нажимными шайбами.

Данные электродвигателей 20—10—2—1 л. с. → 500 об/мин, 250 в, 25 пер/сек, а электродвигателей 5 л. с.—750 об/мин, 250 в, 25 пер/сек. Обмотка статора двигателей 20—10 л. с. стержневого типа, а двигателей 5—2—1 л. с.—катушечного типа. Обмотка статоров соединена в звезду. Все виды ремонтов генератора и электродвигателей производились персоналом электростанции элеватора.

Помимо генераторов трехфазного тока на электростанции были установлены три динамомашины постоянного тока напряжением 160 в. Каждая динамомашина приводилась во вращение вертикальной паровой машиной мощностью 50...75 л. с. Вырабатываемая ими электроэнергия сосредоточивалась на шинах небольшого деревянного щита. Электроэнергия предназначалась в основном для наружного освещения территории железной дороги дуговыми лампами и частично для внутреннего освещения: вокзала ж. д., депо и других производственных помещений теми же дуговыми лампами. Дуговые лампы соединялись последовательно по 4 шт. в группе.

Особенностью этой большой по тогдашним временам (1893 г.) электростанции Новороссийского элеватора является то, что эта электростан-

ция впервые в России начала работать на трехфазном токе, а также и то, что электрогенераторы и электродвигатели трехфазного переменного тока были изготовлены в мастерских этой электростанции своим персоналом.

Главное руководство работами по строительству электростанции на ст. Новороссийск вел инж. Александр Николаевич Щенснович.

А. Н. Щенснович являлся руководителем всех работ технической части службы пути и зданий на ст. Новороссийск: строительства элеватора, межскладов, пристаней, железнодорожного путевого парка, зданий и сооружений, складов для зерна и прочих железнодорожных сооружений. Эксплуатация этого большого хозяйства также была подведомственна А. Н. Щенсновичу. Он отличался трудолюбием и инициативностью. На каждом участке строительства ежедневно можно было видеть А. Н. Щенсновича. В период эксплуатации электростанции А. Н. Щенснович ежедневно был на этой станции с 7—8 час. утра; в первую очередь он заходил в котельное отделение станции, а потом в машинное отделение; при этом он задавал обслуживающему персоналу вопросы по работе. Во второй половине дня Александр Николаевич объезжал все участки подведомственных ему работ. Он всегда был полностью поглощен работой, несмотря на преклонный возраст.

К людям Александр Николаевич относился без пренебрежения, но был требователен по работе и всегда был рад, когда замечал серьезное отношение к выполняемой работе со стороны того или иного работника.

В 1917 г. А. Н. Щенснович был командирован Управлением Владикавказской железной дороги во Владивосток в связи с приемкой для железной дороги партии паровозов.

С тех пор я о нем ничего не слышал.

В. Ф. АКСЕНОВ

Ст. инженер Техотдела В/О Востокзаготзерно



Дискуссии

Об учебнике по теоретической электротехнике для высшей школы

(Электричество, № 6, 7, 10, 11, 1953)

**А. Ф. МЕТЕЛКИН
и инж. К. А. КАРПОВА**

Ивановский энергетический институт им. Ленина

Содержание первой главы учебника под общей редакцией К. А. Круга обусловлено тем обстоятельством, что «Во многих вузах, судя по существующим учебникам по физике, — говорится в предисловии к книге, — преподавание физики не согласовано с преподаванием электротехники. Так, например, в курсах физики запись соотношений, связывающих величины, характеризующие электрические и магнитные явления, не приводится в принятой в электротехнике рационализированной форме, не всегда принимается в основу измерений и вычислений абсолютная практическая система единиц, определение понятий некоторых магнитных величин базируется на магнитных массах». Надо признать, что это замечание о существующих учебных пособиях по физике в основном справедливо: между учебниками по физике и электротехнике действительно нет полной преемственности. Поэтому студент при самостоятельной работе не сразу овладевает формулой в различной форме записи и, конечно, затрудняется в преобразованиях ее. Помочь в этом случае читателю могут оказать дополнительные или вступительные главы учебника. Такого рода краткие дополнительные главы содержит, например, «Курс физики», составленный К. А. Путиловым при участии В. Фабриканта.

Первая глава учебника под общей редакцией К. А. Круга может рассматриваться только как справочный материал. Формулы в этой главе даны в готовой рационализированной форме записи по системе МКСА. Целесообразность этой главы для подготовленного читателя неясна, а для неподготовленного —омнительна. Последний, изучая ее, должен механически запоминать ряд формул.

В этой главе, как и в книге К. А. Круга 1946 г., имеется путаница в отношении ϵ_0 и μ_0 . Так, на стр. 25 утверждается, что в системе СГСЭ «диэлектрическая проницаемость пустоты ϵ_0 принимается равной единице», а в системе СГСМ «единице приравнивается магнитная проницаемость пустоты μ_0 ». Очевидно, авторы придерживаются порочного способа преобразования формулы при переходе от одной системы единиц измерения к другой. Нам кажется, что не следует заниматься упрощением и нарушать основные положения теории размерностей.

В § 1-14—1-16 устанавливаются основные характеристики магнитного поля тока без всяких ссылок на магнитостатику. Однако в рассматриваемой главе читатель не найдет никакого упоминания о магнитных полях постоянных магнитов, а в последующем изложении курса, между прочим, упоминается об элементарных магнитных полях молекулярных токов. Известно, что обоснованию вихревого характера магнитного поля были посвящены экспериментальные исследования Фарадея и теоретические исследования Максвелла. И хотя опыты Фарадея с постоянными магнитами не разрешили этой задачи, авторы на стр. 22 утверждают: «Опыт показывает, что магнитный поток через замкнутую поверхность всегда равен нулю». Это утверждение авторов, конечно, требует разъяснений.

Первая глава учебника под редакцией К. А. Круга нуждается в серьезной переработке. При посредстве этой главы необходимо установить более тесную связь с учебными пособиями по физике.

Остановимся вкратце также на философской стороне таких основных понятий, как понятия об электрическом

и магнитном поле. Первое определение читатель находит на стр. 15: «состоине среды, обусловленное присутствием в ней электрических зарядов, называется электрическим полем. Это же название приписывается и пространству, окружающему электрические заряды, и в этом смысле говорят об участках поля или об его точках». Второе определение читатель встречает на стр. 22: «Магнитное поле представляет собой состоянне материальной среды, обусловленное или движением зарядов, или изменением электрического поля, т. е. электрическим током. В магнитном поле распределена энергия».

Эти определения, конечно, озадачат читателя, так как он при изучении физики усвоил правильные материалистические взгляды на природу электрического и магнитного поля. Возможно, он обратится при этом за справками к учебным пособиям по физике и там обязательно найдет следующее:

1) «Электростатическое поле представляет собою особый вид материи; оно передает действие одних наэлектризованных тел на другие¹».

2) «Энергия есть одна из характеристик состояния материи, и, следовательно, понятие об энергии не может быть оторвано от понятия о материи. Это подтверждает указанный в § 119 вывод, что само электростатическое поле является особым видом материи²».

3) «...поскольку с понятием об эфире исторически твердо связывалось понятие о среде, относительно которой можно определить движение, современная теоретическая физика перестала пользоваться представлением о «среде — эфире» вообще. Мы говорим теперь об электромагнитном поле как об особом виде материи³».

После этого читатель, очевидно, безошибочно скажет, что в первой главе рассматриваемого учебника под общей редакцией К. А. Круга проводятся метафизические взгляды на природу электрического и магнитного поля.

Кандидат техн. наук Л. С. ЛУРЬЕ

ВИЭСХ

Р. А. Воронов, Г. Е. Пухов, Б. А. Борковский и В. Н. Сосунова сделали упрек (Электричество, № 6, 1953, стр. 69) коллективу авторов книги «Основы электротехники», в том, что учебное пособие несколько формально рассматривает вопрос о кажущейся мощности электрических цепей. Они полагают, что следовало указать на то, что кажущаяся мощность в любом случае представляет ту максимальную мощность, которая может быть передана при заданных среднеквадратичных значениях токов и напряжений и что величина ее зависит от выбора точки отсчета напряжений.

Формулы (8-43), (8-46), (11-8), (11-9) и (11-10), однозначно определяющие кажущуюся мощность однофазной и трехфазной равномерно нагруженной цепи при синусоидальном режиме, показывают, что величина кажущейся мощности не может зависеть от выбора точки отсчета

¹ С. Э. Фриш и А. В. Тиморева. Курс общей физики, т. II, стр. 14, § 118, 1953.

² Там же, стр. 67, § 131.

³ Там же, стр. 115, § 144.

напряжений, поскольку ее составляющими являются активная и реактивная мощности. Действительно, активная мощность может быть представлена как сумма скалярных произведений векторов фазных напряжений, взятых относительно любой точки на топографической диаграмме, на вектора токов в этих фазах, а реактивная мощность может быть представлена как модуль суммы векторных произведений тех же векторов. Поскольку векторная сумма токов, протекающих в соединительных (фазных) проводах, равна нулю, любое смещение точки отсчета фазных напряжений не может повлиять на указанные суммы скалярных или векторных произведений, а следовательно, на величину активной и реактивной мощности, и, в конечном счете, на кажущуюся мощность.

Кажущаяся мощность однофазной цепи при несинусоидальном режиме (14-41) также полностью определена действующими значениями тока и междуфазного напряжения и не может зависеть от выбора точки отсчета напряжений.

Вопрос о кажущейся мощности трехфазной цепи при несимметричных и несинусоидальных э. д. с. и токах не рассмотрен в «Основах электротехники». По нашему мнению, и в этих случаях должно использоваться такое определение кажущейся мощности, которое не зависит от выбора точки отсчета напряжений.

Если говорить о кажущейся мощности как о максимальной активной мощности, то в определение, которое дали Р. А. Воронов, Г. Е. Пухов, Б. А. Борковский и В. Н. Сосунова, должно быть внесено уточнение и следует сформулировать это определение так: «Кажущаяся мощность однофазной и симметрично нагруженной трехфазной цепи представляет ту максимальную активную мощность, которая может быть передана при заданных действующих значениях токов и линейных (междуфазных) напряжений или напряжений (для трехфазной цепи), взятых относительно существующей нейтрали, или нейтрали, образованной звездой равных сопротивлений». При несимметричной нагрузке трехфазной цепи кажущаяся мощность, по нашему мнению, должна быть определена как максимальная активная мощность, которая может быть передана при заданных потерях в сети и заданных действующих значениях линейных напряжений. При таком определении отпадает вопрос о том, относительно какой точки должны быть взяты фазные напряжения, так как при отыскании указанного максимума устанавливается, что такой точкой является центр тяжести треугольника линейных напряжений любой гармонической составляющей.

В «Основах» при рассмотрении несинусоидального режима в однофазной цепи (стр. 192) указано, что равенство между квадратом кажущейся мощности и суммой квадратов активной и реактивной мощностей выполняется тогда, когда форма кривой напряжения повторяет форму кривой тока. На самом деле это равенство, при котором мощность искажения становится нулем, имеет место только в том случае, если для всех гармоник сдвиг фаз между напряжением и током, а также отношение напряжения к току одинаковы по величине. В то же время при одинаковых формах тока и напряжения углы сдвига между напряжениями и токами отдельных гармоник могут быть самыми различными.

**Кандидат техн. наук,
доц. Г. Р. РАХИМОВ**

Среднеазиатский политехнический институт

Объем и характер основных вопросов теории, необходимых современному специалисту-электрику, непрерывно меняется. Поэтому нельзя создать единый «стабильный» учебник теоретической электротехники для высшей школы. Является вполне закономерным наличие нескольких учебников, отражающих направление научных школ и особенности тех или иных крупных специальностей.

Обсуждаемые в журнале учебники (учебник ЛПИ и учебник МЭИ) были созданы на базе многолетнего опыта крупных электротехнических школ нашей страны.

Характер курса теоретической электротехники и его место среди других дисциплин высшей электротехнической

школы требуют перестройки учебных программ не только данного курса, но и смежных общегеоретических и специальных предметов. Программа курса высшей математики должна быть пересмотрена в сторону расширения; векторный анализ, теория функций комплексных переменных, дифференциальные уравнения с частными производными, интегралы Фурье и др., должны излагаться в курсе высшей математики. Общие вопросы теории электромагнитизма, электронной теории, теории колебания и другие должны излагаться в курсе физики. В курсе теоретической электротехники следует сохранить вводную часть (так называемые физические основы), позволяющую методически легко подойти к изложению теории электрических цепей и электромагнитного поля.

Несмотря на широкое применение в электротехнике электродинамических систем, учебники теоретической электротехники не излагают теорию таких систем, относя это целиком к компетенции специальных курсов. Однако необходимость изложения теории электродинамических систем связана с широким распространением ряда общих задач, относящихся к установившимся и переходным явлениям в электрических машинах и электропрерывательных системах, к теории автоматического регулирования, теории приборо- и аппаратостроения и др.¹. Курс теоретической электротехники следует составить из следующих основных разделов: Введение (физические основы); I. Теория электрических и магнитных цепей; II. Теория электромагнитного поля; III. Теория электродинамических систем.

Следует указать на некоторые недостатки, имеющиеся в обсуждаемых учебниках.

1. Объяснение явления электромагнитной индукции должно быть тесно связано с объяснением природы электромагнитной силы. При этом особо следует подчеркнуть единство электромагнитной индукции и электромагнитной силы. Явление электромагнитной индукции всегда сопровождается возникновением электромагнитной силы и наоборот. Этот основной принцип электромагнитизма (принцип Ленца) обязательно должен быть четко сформулирован в курсах электротехники. Кстати сказать, многие авторы ограничиваются в изложении принципа Ленца только узкими соображениями. Например, в учебнике ЛПИ этот вопрос излагается с точки зрения знака в выражении для индуктированной э. д. с. (§ 59). Основное положение электромагнитизма, сформулированное Ленцем [Л. 1], многие авторы ошибочно называли «правилом» (подобно всяким правилам амперовского «наблюдателя», максвелловского «пробочника», «правой руки» Флеминга и др.). Важнейший вклад, сделанный Э. Х. Ленцем в науку и его совместная работа с Б. С. Якоби по «применению электромагнитизма в качестве активной силы», являются первыми фундаментальными камнями, на которых строилось здание современной электротехники².

2. В теории электрических цепей особое место занимает изучение явления резонанса. Несмотря на большую работу, проделанную советскими учеными [Л. 2] по развитию учения о резонансе, в учебниках теоретической электротехники существует разнобой в объяснении этого явления. Свойство колебательной системы приходить в особо сильные колебания при приближении ее собственной частоты к частоте действующей на нее внешней э. д. с. некоторые авторы своеобразно преломляют при изучении установившихся явлений в электрических цепях. Повидимому эти авторы хотят как-то «согласовать» определение т. н. «резонанса напряжения» и «резонанса токов» путем определения «резонанса» как явления, при котором ток цепи совпадает по фазе с приложенным напряжением. Такое совпадение фаз является вернее всего следствием явления резонанса, нежели условием возникновения его. При изложении явления резонанса лучше всего исходить из частотных условий. Что касается затруднений с «согласованием» резонанса в последовательной и параллельной цепях, то их можно устранить путем толкования процесса

¹ Следует подчеркнуть особую заслугу советских учених (А. А. Горева, Н. Н. Щедрина, М. П. Костенко, В. С. Кулебакина, Г. Н. Петрова, В. В. Соловьевского и др.) в развитии теории электродинамических систем.

² В учебнике ЛПИ, например, не упомянуто об изобретении электродвигателя русским академиком Б. С. Якоби.

с точки зрения того, как задается внешнее воздействие (источник напряжения или источник тока) [Л. 3]. В связи с этим следует подчеркнуть, что там, где нет необходимости в этом «согласовании», авторы стоят на правильной позиции классического определения резонанса (учебник МЭИ, стр. 191, стр. 252; учебник ЛПИ, стр. 247, стр. 299).

Разумеется, наиболее тяжелым вопросом является изложение явления резонанса в нелинейных цепях вообще и резонанса в электроферромагнитных цепях (в цепях со сталью), в частности. Характерно то, что в третьем издании учебника ЛПИ этот вопрос не разбирается; пропущен даже параграф о феррорезонансных кривых, содержащийся в старых изданиях. Определение же феррорезонанса, данное в учебнике МЭИ (стр. 217), пожалуй больше подходит к понятию «опрокидывание фаз», нежели к понятию «феррорезонанс».

Несмотря на большой вклад, сделанный советскими учеными в теорию нелинейных колебаний (в частности, П. Л. Калантаровым по феррорезонансу), учебники очень слабо освещают этот вопрос.

3. В теории электрических цепей вопросы нелинейных электрических цепей приобретают определенную значимость. Поэтому справедливым следует считать введение в учебнике МЭИ главы по переходным процессам в нелинейных цепях. Однако нельзя считать достаточным объем материалов, преподносимых в главах по нелинейным электрическим цепям (гл. V, XVII, XX учебника МЭИ, гл. XXI учебника ЛПИ). Следовало бы в этих главах не ограничиться только цепями с нелинейным активным сопротивлением и нелинейной индуктивностью, а для обобщения понятий и задач нелинейных цепей остановиться также на особенностях электрических цепей с нелинейной емкостью.

В связи с изучением нелинейных электрических цепей следовало бы также коснуться задач электрических цепей с обратной связью, осветив этот вопрос как с физической стороны, так и с точки зрения технических его приложений.

Разделы, посвященные нелинейным цепям, излагаются обособленно, без увязки с теорией линейных электрических цепей. Следовало бы разработать единую теорию электрических цепей.

4. Раздел «теории электромагнитных полей» в учебнике МЭИ преподнесен в формалистическом стиле. Для облегчения методических затруднений авторы прилагают к учебнику «спасательный круг» в виде «элементов векторного анализа». Однако это не облегчает студентам чтение данного раздела.

В учебнике ЛПИ раздел теории электромагнитного поля написан вполне достоверно для студентов-электриков. Можно отметить главу XXXI — «Переменное электромагнитное поле в проводящей среде» учебника ЛПИ как образец хорошо составленной главы учебника. В ней отражаются оригинальные исследования автора в глубоком сочетании теории с практикой. Она является примером того, как можно вопросы теории электромагнитного поля изложить под углом зрения задач электротехники.

5. Изложение истории и значения работ русских и советских ученых и научных школ в учебнике МЭИ в основном сосредоточено на шести страницах «Введения». За исключением двух-трех мест нигде в тексте авторы учебника не отражают теоретических исследований русских и советских ученых. Точно также вопросы методологии слабо затрагиваются в основном тексте. Лучше освещены работы наших соотечественников в учебнике ЛПИ.

Литература

1. Э. Х. Лениц. Об определении направления гальванических токов, возбуждаемых электродинамической индукцией. Избранные труды, М., 1950.

2. Н. Д. Папалекси. Эволюция понятия резонанса. Сборник трудов, стр. 343, 1948.

3. С. П. Стрелков. Введение в теорию колебаний, стр. 91, 1950.

**Кандидат техн. наук,
доц. З. И. КЯЗИМ-ЗАДЕ**

**Азербайджанский индустриальный институт
им. Азизбекова**

Круг теоретических вопросов, лежащих в основе курса ТОЭ, за последнее время очень расширился. Современный учебник ТОЭ должен содержать рассмотрение вопросов электрических цепей с нелинейными параметрами, магнитных цепей, электрических цепей при высокочастотных напряжениях и т. п. Все эти вопросы должны быть тщательно проработаны и соответствующим образом отражены в современном учебнике ТОЭ.

По нашему мнению, учебник ТОЭ должен состоять, в основном, из двух частей: 1) Основы теории электрических и магнитных цепей и 2) Основы теории электромагнитного поля.

Этим двум основным разделам курса должна предшествовать вводная часть, содержащая историю развития электротехники, имена и работы отечественных ученых, изобретателей и новаторов, сведения о развитии электротехники в СССР и т. п. Кроме того, в вводную часть должны быть включены основные физические понятия, служащие предварительным справочным материалом для студентов, впервые изучающих курс ТОЭ.

Надо согласиться с уже высказанными замечаниями о том, что многие вопросы электромагнитного поля в книге П. Л. Калантарова и Л. Р. Неймана распределены неудачно или дублируются (особенно в конце курса). Чтобы разобраться в этой части материала, нужно немалое усилие. Материалы глав I...IV, VII, VIII, XI, XXIV—XXXI по содержанию так близки друг к другу, что отделение общего случая (электромагнитного поля) от частных случаев (электрическое поле, магнитное поле и т. д.) становится возможным только после полного прохождения курса ТОЭ.

Учитывая, что все вопросы, относящиеся к расчету линейных цепей (простых и сложных) постоянного тока, являются лишь частными случаями подобных цепей синусоидального переменного тока, необходимо объединить вопросы (расчетного порядка) линейных цепей постоянного и переменного токов в одну главу. При раздельном прохождении этих глав общность всех этих вопросов линейных цепей постоянного и переменного токов для студентов остается недоступным и, кроме того, значительная часть этих вопросов дублируется (расчет сложных цепей при постоянном и при переменном токе).

Учитывая, что величины синусоидального переменного тока (э. д. с., напряжение, ток и т. д.) при разрешении многих вопросов применяются в виде вращающихся постоянных векторов (действующие значения), необходимо объединить так называемый тригонометрический метод и символический метод в одну главу. При этом, наряду с уравнениями мгновенного значения, надо дать и уравнения действующего значения, т. е.

$$i = V \frac{U}{z} \sin(\omega t - \varphi),$$

$$i = \frac{\dot{U}}{z} e^{j\varphi}.$$

Таким образом, целесообразным и методически правильным является не отделение тригонометрического метода от символического метода, а наоборот, совмещение этих методов, что применяется в учебниках: «Основы электротехники» под ред. К. А. Круга и «Теоретические основы электротехники» (на азербайджанском языке) З. И. Кязим-Заде.

Хочется отметить еще явную недостаточность содержания глав «Магнитные цепи», «Цепи с нелинейными параметрами» и «Переходные процессы в цепях с сосредоточенными параметрами». Необходимо усилить содержание параграфа «Операционный метод».

В книге имеются некоторые упущения и неточности, которые можно отнести к невнимательности редактирования.

Терминология теоретической электротехники

(Электричество, № 1, 9 и 11, 1953)

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

Ивановский энергетический институт им. Ленина

Товарищ А. А. Жданов говорил, что необходимо точно определять предмет науки и в написании учебника основываться на фундаменте современных достижений диалектического и исторического материализма; стиль изложения должен быть ясным, точным и убедительным.

Нельзя сказать, что проект научных определений в области теоретической электротехники в полной мере удовлетворяет этим требованиям, хотя в нем имеется то главное преимущество, что физическая, научная трактовка явлений и терминов в основном соответствует нашим современным знаниям в области электромагнетизма. Однако и этот проект содержит неточности, снижающие его ценность, как руководящего материала для научной трактовки явлений. Пояснительная статья В. М. Лаврова, к сожалению, не исправляет этих неточностей.

Определение теоретической электротехники (в § 1 проекта) значительно сужено по сравнению с фактическим состоянием этой науки, так как теоретическая электротехника занимается вопросами электромагнитных явлений не только в области техники, но и в других областях (медицина, биология, астрофизика и др.). Лучше сказать: «Теоретическая электротехника — это наука, изучающая основные вопросы теории электромагнитных явлений в общественной практике». В определении электричества указано, что оно является свойством материи, особой формой движения материи. Это верно, но не указано, какое это свойство. Предлагаю определить так: «Электричество — один из видов движения материи, проявляющийся в электрической энергии, как меры этого движения. Электричество имеет двойственный характер, состоящий в том, что носителями наименьшего из известных количеств электричества являются протоны и позитроны (положительное электричество), электроны (отрицательное электричество). Количество мерой электричества является электрический заряд, выражаящийся скалярной величиной».

Параграф 3 об электрическом заряде целесообразно вообще изъять, так как его определение входит в понятие электричества.

Параграф 4 должен быть сформулирован более точно, чем это сделано в проекте. Именно: «Заряженная частица — наименьшая из известных материальных частиц, имеющая электрический заряд того или иного знака». Нет оснований говорить об избытке и недостатке положительного или отрицательного электричества, так как более того, что частица имеет заряд того или иного знака, мы пока не знаем. В § 5 об электромагнитном поле нет диалектического единства поля как непрерывной материальной субстанции, способной, однако, проявлять свой дискретный характер. Дискретная характеристика поля дана петитом. Такая трактовка разрывает на две части единое определение. В определении совершенно правильно дана характеристика поля, как одной из форм существования материи. В дальнейшем вводятся поясняющие слова, раскрывающие отдельные стороны проявления электромагнитного поля. В пояснении отмечена и энергетическая сторона электромагнитного поля, где сказано, что энергия поля может переходить в другие виды энергии. О том, что электромагнитное поле является носителем энергии, надо сказать более определенно, чтобы была предельно ясна нетождественность поля и его энергии.

Известно, что дискретность поля объясняется не различной методикой исследования и не его «масштабами», а самой двойственностью явлений электромагнитного поля как непрерывной материальной субстанции и как субстанции, обнаруживающей дискретный, квантовый, характер. Это учтено в следующей формуле определения: «Электромагнитное поле есть форма существования материи, имеющей запас энергии, способной переходить в другие виды энергии (тепловую, механическую и др.). Электромагнитное поле обнаруживает двойственность своей структуры,

проявляющуюся в движении поля со скоростью света (непрерывная материя) и в виде дискретных материальных частиц (фотоны). В § 10 введено понятие «кулоновского поля»; такого поля в природе не существует и введение его в терминологию не дает ничего нового по сравнению с определением § 6, в котором достаточно ясно изложена «электрическая» сторона электромагнитного поля. Таким образом, § 10 должен быть изъят из терминологии.

В определении § 11 взяты как синонимы пустота и вакуум. Однако эти понятия не равнозначны ни в русском языке, ни в физике, ни в технике. Пустота — это логическое понятие, означающее «ничто», и смешивать слова пустота и вакуум нельзя. О вакууме следует сказать: «Состояние предельно разреженной материальной среды, где отсутствуют известные в настоящее время частицы материи, но где может существовать материя в форме поля (тяготения, электромагнитного и др.)».

Вызывает возражение данное в проекте определение электрической поляризации. Более правильно определить ее как явление, когда под влиянием электрического поля в непроводниках электричества нарушается нейтральное, равновесное состояние зарядов, проявляющееся в наличии электрического момента тела.

Нельзя согласиться с определением электрического потенциала, данного в § 33. Здесь опять вводится лишнее понятие «кулоновского» поля. Кроме того, в определении словами производится математическая запись потенциала, но не дается его физическое понятие. Потенциал есть мера уровня энергии поля. Мы полагаем, что данная точка поля имеет определенный потенциал, отличный от нуля тогда, когда имеется энергия поля, хотя работу поле может и не производить. Это же замечание может быть полностью отнесено и к § 34, где определяется понятие разности потенциалов.

Нельзя считать приемлемым определение стороннего электрического поля как не определяющегося законом Кулона. Стороннее электрическое поле есть результат наличия э. д. с., имеющей ту или иную характеристику (характеристики перечислены в определении). Стороннее электрическое поле характеризуется «не отсутствием чего-то», а наоборот, присутствием э. д. с., которая должна быть определена раньше.

В § 44 совершенно формально определена э. д. с. как линейный интеграл по контуру стороннего поля; э. д. с. — физическая причина, создающая стороннее электрическое поле и способная вызвать в проводящих телах электрический ток.

Мало понятным в проекте является определение электрического тока. Добавление о каких-то «других электрических процессах, сопровождающихся магнитным полем», конечно, способно только сбить с толку. Не проще ли определить электрический ток как явление переноса зарядов (движение зарядов) под влиянием электрического поля и других физических причин (химических сил, фотонов и др.). Электрический ток всегда связан с создаваемым им магнитным полем и выражается скалярной величиной, равной поверхностному интегралу от вектора плотности тока (эта величина раньше не была определена!) по данной поверхности.

В определении электрического тока в «пустоте» (§ 52) совершенно не указана главная характеристика такого тока — существование магнитного поля.

Сомнительной является необходимость подробной расшифровки понятий плотностей тока в различных средах (§ 54, 55, 56, 57, 58, 59).

Параграфы 62 и 64 (Электрическая цепь, ее элементы и их характеристики) логически не связаны между собой, так как в одном сопротивление определено как свойство тел при прохождении электрического тока превращать электрическую энергию в тепловую, а в другом

удельное сопротивление определено уже чисто формально, — как множитель при векторе плотности тока в выражении дифференциальной формы закона Ома. То же нужно сказать и относительно электрической проводимости. Более правильно, конечно, определять проводимость и сопротивление как свойство тела.

По § 177, 179 должно быть сделано замечание, что разложение на вынужденный и свободный электрические токи применяется только в линейных цепях.

В заключение необходимо подчеркнуть, что хотя пред-

ставленный проект далеко не охватывает или недостаточно полно охватывает все разделы теоретической электротехники (электроника, газовый разряд, теория магнитных цепей, нелинейные цепи), в целом работа комиссии Комитета технической терминологии Академии наук СССР должна быть одобрена как ценное продолжение и улучшение ранее обсуждавшихся проектов научных определений теоретической электротехники. Надо пожелать комиссии, чтобы она в короткий срок закончила свою работу с учетом материалов дискуссии и представила на утверждение окончательный проект терминологии.



ЗАМЕТКИ И ПИСЬМА

К ВОПРОСУ О ПЕРЕСМОТРЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМИНОЛОГИИ

Положительные результаты работы по пересмотру научно-технической терминологии несомненны. Во многих случаях повысилась четкость терминологии, ряд чуждых русскому языку слов исчез из употребления, уступив место русским словам. Однако в работе по пересмотру терминов не все обстоит благополучно и некоторые вопросы следует обсудить более широко, чем это до сих пор делалось.

Терминология любой отрасли науки и техники не является набором отдельных слов, а представляет собой сложившуюся, хотя и далеко не совершенную, систему связанных между собой терминов. Одной из главных задач пересмотра терминов является именно приведение терминологии в более четкую и стойкую систему. Комитет по технической терминологии Академии наук СССР, возглавляющий эту работу, примерно так и ведет ее, последовательно рассматривая терминологию различных отраслей. Но некоторые учебные заведения и группы ученых в ряде случаев рассматривают лишь отдельные термины или группы терминов, представляющие им неудачными или ненужными, и выносят часто до конца не продуманные решения о замене или исключении отдельных терминов.

Краткость является таким же решающим требованием к термину, как и точность. Очень часто эти требования противоречат одно другому. Нередко пересмотр терминов кончается тем, что краткие термины заменяются громоздкими. Такое решение нежизненно, так как в практике громоздкий термин все равно будет сокращаться, причем новый сокращенный термин может оказаться хуже первоначально замеченного.

При пересмотре терминов иностранного происхождения иногда недостаточно учитывается степень фактического внедрения термина. Так, если термин широко применяется в течение нескольких десятилетий в русской классической научно-технической литературе, в официальных изданиях (стандартах, каталогах, чертежах и т. д.) и в итоге прочно вошел в обиход технического персонала и рабочих, то замена вряд ли целесообразна. Особенно осторожно следует подходить к замене терминов, имеющих международное применение.

При выборе терминов необходимо учитывать интересы русского языка в целом. В работе И. В. Сталина «Относительно марксизма в языкоznании» сказано: «Непрерывный рост промышленности и сельского хозяйства, торговли и транспорта, техники и науки требует от языка пополнения его словаря новыми словами и выражениями, необходимыми для их работы. И язык, непосредственно отражая эти нужды, пополняет свой словарь новыми словами, совершенствует свой грамматический строй». При выборе терминов необходимо оценивать, насколько они соответствуют основным законам русского языка. Вновь разрабатываемая терминология должна предварительно широко обсуждаться не только специалистами той узкой отрасли науки и техники, к которой она непосредственно относится, но также специалистами других отраслей, где эти термины или их производные применяются, и языковедами. Комитет по технической терминологии Академии

наук СССР выпускает бюллетени и сборники рекомендуемых терминов и рассыпает их для обсуждения. Однако эти издания известны лишь очень узкому кругу лиц. Необходимо их распространять более широко, публиковать проекты терминологий в ведущих журналах заинтересованных отраслей науки и техники и открывать по ним дискуссию. Некоторые учебные и научные учреждения рассматривают и принимают те или иные изменения в терминологии иногда без предварительного публикования и широкого обсуждения. Мало того, наблюдаются случаи, когда подобные изменения, не подвергнутые широкому обсуждению и не рассмотренные еще Комитетом по технической терминологии, внедряются в практику учебного процесса, в документацию и даже в научную литературу. Издательства, вместо того чтобы руководствоваться рекомендациями Комитета по технической терминологии и придерживаться установившейся терминологии при отсутствии таких рекомендаций, допускают, а иногда и навязывают замену некоторых установившихся терминов на новые. Так как разные издательства делают это независимо одно от другого, появляется разнобой в терминологии.

Рассмотрим отдельные примеры. Предлагается, например, изъять из употребления слово «мотор». Это нетрудно сделать, так как имеется подлинно русское слово «двигатель», равнозначное ему и широко применяемое. Однако слово «мотор», несмотря на иностранное происхождение, хорошо соответствует по своей структуре особенностям русского языка и, надо сказать, русский язык использовал это слово более широко, чем другие языки, образовав такие слова, как «моторный», «моторизация», «моторизованный» и т. д. В особенности удобно слово «мотор» в сложных выражениях: мотоцикл, моторные вагоны, мотор-вагонная тяга, мотор-генераторный электровоз, винтомоторный самолет, моторно-осевые подшипники и т. д. Слово «мотор» является массовым словом, широко применяемым в художественной и социально-политической литературе, в рабочей среде и к тому же этот термин является международным. Поэтому представляется целесообразным наряду с основным термином «двигатель» сохранить как второй термин «мотор», рекомендуя его главным образом для сложных словообразований.

Вместо слов «шунтовой, серийный, компаундный генератор (двигатель)» некоторые предлагают применять выражения «генератор (двигатель) с параллельным возбуждением, последовательным возбуждением, смешанным возбуждением». В классической научной литературе применяются и те и другие термины, причем первые две пары соответственно равнозначны. Очевидно, поэтому первые, как лишние термины иностранного происхождения, предлагается изъять. Однако имеется ряд возражений против этого. Полные термины громоздки и усложняют изложение в особенности в книгах, анализирующих схемы, в которых разные двигатели соединяются различным образом. Фраза «двигатель с параллельным возбуждением соединен параллельно с генератором с параллельным возбуждением» сложна и неудобочитаема. Слово «шунт» использовано в русском языке весьма удачно и многообразно. Помимо

прямого использования (шунт амперметра, индуктивный шунт), в котором его трудно заменить, широкое применение имеют такие словообразования, как шунтировать, шунтирующее, шунтирующий, шунтированный, шунтировка, которые придают большую гибкость и богатство оттенков изложению. Близкое по смыслу слово «параллель» меньше соответствует законам русского языка и ни в коей мере не может равнозначно заменить указанные выше слова, не говоря о том, что слово «параллель» и его немногие производные и без того имеют достаточное использование в языке. Устранив все слова с корнем «шунт» крайне нецелесообразно. Но если их сохранить, нет никакого смысла устранив удобный и краткий термин «шунтовой», тем более, что он свыше 50 лет применяется в научной литературе, официальных изданиях и документах и широко вошел в язык инженерно-технических работников и рабочих.

Еще больше оснований сохранить слово «компаундный». Это слово является примером творческого освоения иностранного слова в русском языке. Буквально оно переводится словом «смешанный». Однако в русском языке наряду с термином «смешанное возбуждение», означающее возбуждение с помощью нескольких обмоток, произвольно питаемых, утвердился термин «компаундный» для одной частной, но широко распространенной системы возбуждения, когда к основной обмотке добавляется последовательная обмотка, имеющая целью сохранить или несколько повысить магнитный поток при увеличении нагрузки.

Слово «компаундный» также дало ряд часто применяемых словообразований: компаундировать, компаундирование, компаундирующий, компаундированный и др. Следует отметить также, что термин «компаундирование» используется не только как первоначально в применении к машинам постоянного тока, но и в применении к синхронным машинам, регуляторам и т. д. В русском языке получил распространение термин «противокомпаундный», означающий систему возбуждения, в которой последовательная обмотка действует навстречу основной. Против этого термина выдвигались возражения, что в буквальном переводе он является бессмысленным и что сочетание рус-

ского «против» с иностранным «компаунд» плохо звучит. Однако, как мы уже показали, слово «компаундный» в русском языке по применению не совпадает полностью со словом «смешанный» и означает систему возбуждения, в которой поток усиливается с нагрузкой. Слово «противокомпаундный» означает возбуждение, при котором магнитный поток ослабляется с нагрузкой и при практическом использовании не вызывает сомнений и разноречий. Сочетание же «противокомпаундный» ничем не хуже, чем «самоиндукция», «перемагничивание» и т. д. В то же время заменить слово «противокомпаундный» трудно. Попадающиеся в литературе выражения: смешанное противовозбуждение, встречно-смешанное возбуждение громоздки и нечетки. Слово «серийный» менее удачно, чем «шунтовой» и «компаундный», но оно также удобно. Мы полагаем, что эти термины следует сохранить, как рекомендуемые краткие термины наряду с основными, более полными.

Использование иностранных слов для научно-технических терминов может оказаться целесообразным, если это способствует развитию русского языка и согласуется с законами последнего. Это не означает, конечно, что следует сохранить все устаревшие термины иностранного происхождения в нашей терминологии. Она еще в значительной степени засорена ненужными и несвойственными русскому языку словами и работа по замене их русскими словами должна продолжаться. Однако следует помнить, что изолированных, независимых один от другого терминов нет, что каждый конкретный термин занимает определенное место в общей системе терминологии. Поэтому не следует выхватывать отдельные термины или их группы и решать их судьбу, а нужно вести планомерно работу по пересмотру и систематизации всей терминологии каждой узкой отрасли науки, учитывая при этом не только нужды и интересы этой отрасли, но нужды и интересы других отраслей науки, а также интересы развития и совершенствования русского языка в целом.

Кандидат техн. наук, доц. А. Д. СТЕПАНОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

ОТ РЕДАКЦИИ

Ввиду спорности некоторых предложений автора, редакция считает целесообразным провести обсуждение на страницах журнала заметки А. Д. Степанова.

О ТЕРМИНЕ „РЕАКТИВНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ“

(Электричество, № 5, 1953, стр. 79)

В связи с опубликованной заметкой А. Я. Бергера о желательности замены термина «синхронная реактивная машина» предлагаю называть такой двигатель словом «синхротрон». Полагаю, что данный термин, при

своей краткости лучше передает характерные особенности этой машины.

Инж. Е. Ф. ОТВАГИН
Ленинградский институт точной механики и оптики

ПО ПОВОДУ РЕЦЕНЗИИ НА СПРАВОЧНИК ЭЛЕКТРОМОНТАЖНИКА. т. I

(Электричество, № 6, 1953)

В опубликованной рецензии инж. Б. С. Татко на изданный Ленинградским отделением Государственного научно-технического издательства машиностроительной и судостроительной литературы «Справочник электропромуышленника, т. I, под ред. Г. И. Китаенко» (647 стр.) дан тщательный обзор содержания этой книги и выражено пожелание, чтобы авторский коллектив учел замечания рецензии, в частности, при подготовке к печати второго и третьего томов справочника.

Обсудив эту рецензию, издательство и коллектив авторов этого издания выражают благодарность за серьезную

оценку проделанной работы и высказанные ценные замечания.

С большинством замечаний авторский коллектив согласен и учтет их при подготовке к изданию последующих томов Справочника, а также при переиздании первого тома. В дальнейшей работе над Справочником будут учтены замечания и пожелания читателей.

С. ЛУЧИННОВ
Главный редактор Ленмашиза по судостроительной литературе

ПО ПОВОДУ СТАТЬИ С. Г. ТАМАНЦЕВА „СИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР С САМОВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ МЕХАНИЧЕСКОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ И АВТОМАТИЧЕСКИМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ“

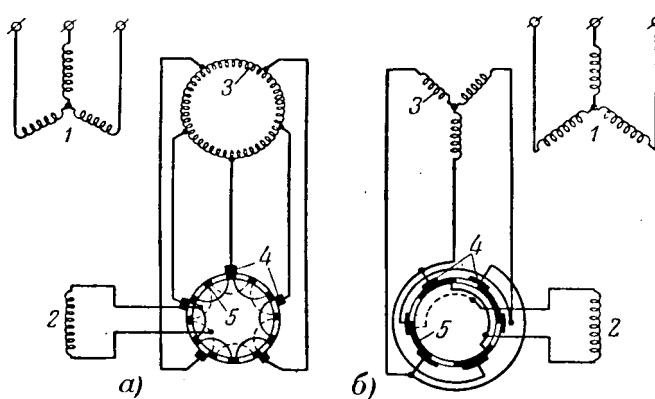
(Электричество, № 3, 1952)

С Г Таманцев сделал в своей статье обзор работ ряда зарубежных ученых за последние 50 лет и пришел к совершенно правильному выводу, что «Проблема встроенного механического выпрямителя со скользящим контактом не была решена в странах Западной Европы и Америки». Однако в следующей затем фразе («В Советском Союзе к практической разработке этой проблемы приступили в 1944 г. в Научно-исследовательском институте Министерства электропромышленности») автор статьи допустил неточность.

Дело в том, что уже с 1927 г. ленинградский завод «Электросила» работал над этой проблемой. Оригинальное решение последней было зафиксировано авторским свидетельством 1933 г.¹ и описано в статье «Самовоз-

в статье С. Г. Таманцева с рис. 2 в моей статье, а также с рис. 1 из авторского свидетельства.

Здесь воспроизведены указанные рисунки 3 и 2 (рис. а и б); причем для удобства сравнения обе схемы выполнены в чертежном отношении аналогично. Компаундирующее устройство генератора НИИ МЭП здесь не показано. Различие в числе активных пластин коллекторов (электрических — щеток) вызвано неодинаковым числом полюсов в обеих машинах. Как видно из этих рисунков, различие между ними заключается лишь в том, что НИИ МЭП вместо многосекционной обмотки постоянного тока (рис. а) применил трехфазную обмотку (рис. б); из-за этого в машине НИИ МЭП всегда находятся в замкнутом накоротко (точнее — через щетки) состоянии



Самовозбуждающиеся синхронные машины:
а — завода „Электросила“; б — НИИ МЭП.

1 — обмотка статора синхронной машины; 2 — обмотка ротора синхронной машины; 3 — обмотка постоянного тока; 4 — щетки; 5 — коллектор.

в — Схема генератора с механическим выпрямителем (рис. 3 из статьи С. Г. Таманцева).

1 — главная обмотка генератора; 2 — трансформаторы тока; 3 — вспомогательная обмотка генератора; 4 — индуктор; 5 — шунты трансформаторов тока; i_θ — ток, обусловленный вспомогательной обмоткой; i_m — ток трансформатора тока; i_{us} — результирующий ток в шунте.

буждающаяся синхронная машина», напечатанной в № 14 журнала «Электричество» за 1935 г.

Об этой работе в статье С. Г. Таманцева не упоминается. Рассмотренный в статье генератор НИИ МЭП — синхронная машина со встроенной в нее неподвижной обмоткой якоря обращенного генератора постоянного тока со своеобразной, также обращенной системой щетки-коллектор (щетки выполняют функцию пластин коллектора, пластины коллектора — функции щеток; впервые этот принцип применен в компенсированном асинхронном двигателе Лютера-Костенко), причем этот генератор имеет общий магнитопровод с синхронной машиной — в принципе полностью совпадает со схемой и устройством генератора «Электросилы». Достаточно сравнить рис. 3

2/3 всей обмотки, тогда как в машине «Электросилы» в процессе коммутации накоротко замыкается лишь одна секция.

В упомянутой выше статье 1935 г. описана специальная обмотка постоянного тока с сокращенным числом коллекторных пластин (конструктивно — щеток) и, следовательно, секций; на рис. а их показано 5, в опытной машине их было 9. Очевидно, что в машине НИИ МЭП коммутация происходит в значительно более тяжелых условиях, чем в машине завода «Электросила».

Судя по рис. 3 в статье С. Г. Таманцева (здесь рис. в) в машине НИИ МЭП вторичные обмотки трансформаторов тока разных фаз включены между собой последовательно; такое включение совершенно нецелесообразно, так как повышает вторичные и первичные напряжения трансформаторов тока, увеличивая тем самым их результирующие сопротивления, вносяимые ими в ответвления. Указанные обмотки заводу, выпускающему эти машины, следовало бы соединить между собой параллельно.

Доктор техн. наук, проф. А. Е. КАПЛЯНСКИЙ

ОТВЕТ АВТОРА СТАТЬИ

Неудача, постигшая «самовозбуждающуюся синхронную машину» А. Е. Каплянского, была вызвана непрородуманной схемой и конструкцией. В ней была допущена основная ошибка — не была применена существовавшая уже в те годы схема компаундирования. Как показали исследования, проведенные НИИ МЭП в 1944—1946 гг., никакие многосекционные обмотки постоянного тока не обеспечива-

ют безискровой коммутации, если не предусмотрено постоянство вектора напряжения на щетках выпрямителя по отношению к врачающемуся индуктору, что достигается только трансформаторами тока (компаундирование). Генератор инж. Каплянского мощностью 100 ква, 600 об/мин имел обращенный коллектор Р. А. Лютера и М. П. Костенко, 3 контактных кольца и громоздкий маг-

¹ Авторское свидетельство № 31501 на самовозбуждающуюся синхронную машину, зависимое от патента № 1618 (М. П. Костенко и Р. А. Лютера). Выдано А. Е. Каплянскому 31 августа 1933 г. по заявке от 22 апреля 1927 г.

Элементы сравнения	Генератор „Электросила“ (А. Е. Каплянского)	Генератор НИИ МЭП (С. Г. Таманцева)
Неподвижная обмотка якоря Механический выпрямитель	Замкнутая многосекционная Коллектор системы Лютер-Костенко	Разомкнутая трехсекционная Переключатель фаз, а не система кол- лектор—щетки Три (всегда равно числу фаз генератора)
Число ответвлений от неподвижной якорной обмотки	Девять (в новом варианте пять)	
Отношение числа неактивных пластин к числу активных	Равно $\frac{70}{20} = 3,5$. У быстроходных машин оно еще больше, что дает плохо ис- пользуемый коллектор	Равно $\frac{10}{20} = 0,5$ — постоянной величине и не зависит от числа оборотов ротора, что дает хорошо используемый пере- ключатель фаз
Длина дуги контакта между щеткой и механическим выпрямителем	Равна длине дуги активной пластины и составляется из двух щеток	Равна длине дуги неактивной пластины и образуется одной щеткой
Число щеток (электрических пластин)	Девять (в новом варианте пять)	Пятнадцать — максимум; шесть — мини- мум. Максимально допустимое число щеток равно произведению числа фаз на число пар полюсов
Полный период коммутации в элек- трических градусах	Равен $\frac{2\pi}{2z} = 20^\circ$ у опытной машины (где z — число ответвлений) и 36° — для но- вого варианта. Секция коммутируется за один прием	Всегда равен 120° . Фаза коммутирует до нуля в течение 60° с одной фазой, а затем до номинальной величины обратного знака с другой также в тече- ние 60°
Регулирование напряжения	Ручное, помошью магнитного регулято- ра и двух контактных колец со щет- кодержателями	Автоматическое, помошью трех транс- форматоров тока, вторичные обмотки которых секционированы и шунтиро- ваны активными сопротивлениями
Компенсация влияния изменения внут- реннего угла θ на коммутацию при нагрузке	Не имеется (А. Е. Каплянскому не уда- лось выявить причину эрозии и найти способ борьбы с ней; эрозию из-за искрения он объяснил вибрацией щет- кодержателей, что неправильно). Без компенсации генератор совершенно неработоспособен из-за эрозии кол- лектора	Имеется. Компенсация производится путем поворота вектора напряжения на зажимах неподвижной обмотки якоря при нагрузке к линии э. д. с. холо- стого хода

житный регулятор тока возбуждения, от которого электромашиностроение в тот период уже отказалось, используя только небольшой шунтовой регулятор в цепи возбуждения возбудителя. Механический выпрямитель при работе искрил. Требовалось ручное регулирование при изменении нагрузки. Генератор был явно неудачен, в схеме его нельзя было усмотреть оригинальное решение задачи и потому, собственно, промышленность его не приняла.

В своей статье я решил не упоминать о «самовозбуждающейся синхронной машине» А. Е. Каплянского единственно вследствие нежелания дезориентировать нашу техническую общественность.

Мнение А. Е. Каплянского, что генератор НИИ МЭП (С. Г. Таманцева) в принципе полностью совпадает со схемой и устройством генератора «Электросила» (А. Е. Каплянского) ошибочно.

Если под «принципиальным совпадением» понимать только механическое выпрямление тока, то в этом случае эти схемы действительно «принципиально совпадают», впрочем так же, как и схемы завода «Ганц» в Будапеште

(1896 г.), схема инж. Александерсена (1906 г.) и многие др.

При правильном в техническом отношении сравнении систем возбуждения генераторов на 600 об/мин мы получим результат, приведенный в таблице.

Таким образом, система возбуждения в схеме НИИ МЭП ни в одном пункте не соответствует системе А. Е. Каплянского.

Рекомендация А. Е. Каплянского на счет порядка включения обмоток неправильна. Безискровая коммутация механического выпрямителя в схеме НИИ МЭП получена потому, что вторичные обмотки различных фаз трансформаторов тока включены последовательно и попарно. Такое соединение обеспечивает точный поворот фазы тока при коммутации. Вторичные обмотки имеют различные числа витков и соединять их параллельно, как советует А. Е. Каплянский, конечно, нельзя. Приходится сожалеть, что А. Е. Каплянский счел возможным опубликовать свою рекомендацию без предварительной проверки её хотя бы в лабораторных условиях.

Инж. С. Г. ТАМАНЦЕВ



По страницам технических журналов

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ТРУДАХ РУССКИХ ФИЗИКОВ ДО ОПЫТОВ ГЕРЦА

В борьбе за переход учения об электрических и магнитных явлениях на позиции материалистической концепции близкодействия большую прогрессивную роль сыграли русские ученые, начиная с М. В. Ломоносова.

Теории Ампера, Вебера, Неймана и др., опиравшиеся на принципы дальнодействия, не отражали качественных особенностей электромагнитных явлений, не были согласны с опытными данными и толкали науку на путь математического формализма.

Русские физики XVIII и XIX вв. накопили богатый опытный материал, позволивший им еще до опытов Герца внести значительный и решающий вклад в создание экспериментальной базы для развития материалистической теории электромагнитного поля. Ломоносов при поддержке Эйлера активно выступал против спекулятивных идеалистических взглядов сторонников дальнодействия [Л. 1]. Он развивал в своих трудах принцип вечности материи и движения, безусловности причинных связей между явлениями природы: нет пустоты, нет передачи взаимодействий без участия промежуточной среды. Если у Декарта представления о близкодействии носили чисто умозрительный характер, а Гюйген рас пространил эту концепцию лишь на область световых явлений, то впервые у Ломоносова близкодействие приобрело значение боевой физической концепции, применяемой в качестве метода научного исследования. Причину электрических явлений Ломоносов усматривал в движении среды, окружающей взаимодействующие тела [Л. 2].

Воззрения Ломоносова были развиты в середине XVIII в. петербургским академиком Эйлером [Л. 3]. В середине XIX в. они были возрождены в трудах Фарадея и Максвелла, выступивших против идеалистических положений электродинамики Ампера.

Научный метод Фарадея имел много общего с творчеством великого Ломоносова. И эта связь неслучайна, ибо в исследованиях Фарадея (например, Л. 4) живо чувствуется влияние «Писем» Эйлера [Л. 3], примикивших к воззрениям Ломоносова, в частности к его эфирной теории электричества. Фарадей изгнал из теории электромагнитных явлений идею о центральных дальнодействующих силах.

Максвелл математически оформил воззрения Фарадея, развел их и сформулировал новую, прогрессивную теорию поля [Л. 5]: «Теория, которую я предлагаю, — писал Максвелл, — может... быть названа теорией электромагнитного поля, так как она имеет дело с пространством, окружающим электрические или магнитные тела. Она может быть также названа динамической теорией, потому что она предполагает, что в этом пространстве имеется находящаяся в движении материя, производящая наблюдаемые электромагнитные явления». Центральным пунктом новой теории, содерявшей возможности для предсказания новых связей, открытия новых явлений, была гипотеза о существовании токов смещения; Максвелл тем самым «ожидал» пустоту, подорвал еще больше основы *«actio in distans»*.

Однако противники воззрений Ломоносова, Фарадея, Максвелла продолжали господствовать, отвергая максвелловскую теорию поля, упорно защищая традиционные, насквозь идеалистические и метафизические, положения ньютонианцев (важно отметить, что сам Ньютон в отличие от прикрывавшихся его именем «последователей» считал абсурдной мысль о возможности передачи взаимодействия через пустоту). Новая теория оставалась в забвении, пока на сцену не выступила школа

русских физиков, руководимая А. Г. Столетовым. Россия, поистине, оказалась второй родиной теории электромагнитного поля.

Русские физики в своих трудах [Л. 6] призывали ученых всех стран принять участие в укреплении позиций молодой прогрессивной теории. А. Г. Столетов направил усилия своих учеников на создание экспериментальной базы теории электромагнитного поля. Наиболее важные результаты в этом направлении были получены Николаем Николаевичем Шиллером. Он экспериментально укрепил гипотезу о существовании токов смещения. В итоге выполненных оригинальных опытов Н. Н. Шиллер смог заявить. «...в электродинамическом отношении нет концов тока и диэлектрики действуют как проводники» [Л. 7]. Заслуживают упоминания также экспериментальные исследования Н. Н. Шиллера, связанные с электромагнитной теорией света, а также опыты по определению зависимости ϵ от частоты электрических колебаний и от напряженности электрического поля [Л. 8].

К исследованиям Н. Н. Шиллера тесно примыкают исследования другого ученика А. Г. Столетова — Петра Алексеевича Зилова, в которых он обосновал справедливость материалистических представлений фарадея-максвелловской гипотезы о непременном участии промежуточной среды в процессах взаимодействия между наэлектризованными, намагнченными или обтекаемыми током телами [Л. 9]. При этом П. А. Зилов за 10 лет до опытов Герца высказал замечательное, буквально пророческое, убеждение, что «...действие электромагнитных сил распространяется точно так же, как световые колебания в прозрачной среде. Что касается длины электрических волн, то надо думать, что она бесконечно велика сравнительно с длиной световых волн».

На основе чрезвычайно тонких опытов ученик А. Г. Столетова Р. А. Колли внес ценный вклад в выяснение природы и закономерностей электрического тока в электролитах; в 1881 г. он выступил с замечательной статьей [Л. 10], в которой развел идеи Максвелла по поводу существования части энергии поля T_{me} . В направлении, избранном Р. А. Колли, после его смерти успешно вел изыскания голландский физик де Дурд Роберту Андреевичу Колли принадлежит также заслуга в экспериментальном обосновании наличия инерции у электрических зарядов.

Большой исторический интерес имеют публичные выступления известного русского профессора Ивана Ивановича Боргмана, посвященные теории Максвелла. В речи «Электромагнитная теория света» [Л. 11] И. И. Боргман, характеризуя прогрессивное значение новой теории, подчеркивает решающую роль опытов русских ученых Зилова и Шиллера для ее обоснования.

Русской физике принадлежит честь создания значительной части экспериментальной базы теории электромагнитного поля.

Литература

1. М. В. Ломоносов. Собр. соч., т. 2, Письма к Эйлеру, 1951.
2. Б. Н. Меншуткин. Труды Ломоносова по физике и химии. Академиздат, 1936.
3. Л. Эйлер. Письма о разных физических и философических материалах, ч. I. Спб., 1768.
4. М. Faraday. Experiment, Research in Electricity, т. III, 1855.
5. J. Maxwell. Динамическая теория электромагнитного поля, Phil. Trans., т. 155, стр. 459, 1865.

6. „Речи и протоколы VI съезда русских естествоиспытателей и врачей в Петербурге“. Спб., 1880.

7. Н. Н. Шиллер. Киевские университетские известия, № 2, 3, 1876.

8. Н. Н. Шиллер. Математический сборник, 1874; Pogg. Ann., т. 152, стр. 535, 1874.

9. П. А. Зилов. Опытное исследование диэлектрической поляризации в жидкостях, 1877.

10. Р. А. Колли. ЖРФХО, т. 8, вып. 4, 1876, Pogg. Ann., т. 157, стр. 570, 1876.

11. И. И. Боргман. ЖРФХО, т. 9, вып. 7, 1877. (Успехи физических наук, т. 49, вып. 4, стр. 569, В. М. Дуков)

ПЛОВУЧАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ

Снабжение электрической энергией скважин, бурящихся в море, в основном производится в настоящее время от электрических станций малой мощности, что сопряжено со многими неудобствами — частый капитальный ремонт, низкий к. п. д., трудность обслуживания и т. д. Сооружение пловучей электростанции, способной передавать энергию в радиусе 3...5 км, целесообразнее удовлет-

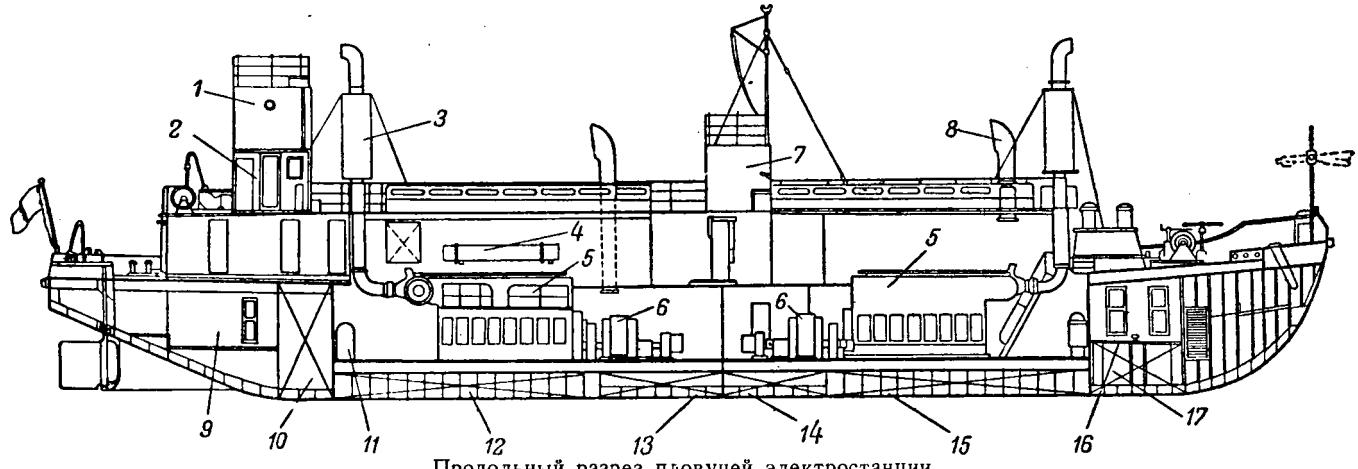
ствоватьенным нуждам стационарных станций покрываются двумя трансформаторами типа ТС-50/6, мощностью по 50 квт. Вспомогательный дизель-генератор мощностью 40 л. с. предназначен для обеспечения запуска станции и для питания электрических двигателей пожарных насосов при остановке станции.

Разработана специальная система передачи электрической энергии с плавающей электростанции к потребителям кабелем марки ГТШ сечением 3×50 мм².

Стоимость пловучей электростанции по расчетам получается примерно в 1,5 раза меньше стоимости аналогичной стационарной установки. Также значительно дешевле получается и отпускаемая энергия.

Пловучие электростанции при благоприятных результатах эксплуатации могут быть рекомендованы не только для удовлетворения нужд нефтяной промышленности, но и для обеспечения различных строительных работ, производимых как в море, так и на реках — сооружение эстакад, маяков, водозаборов, береговых укрепительных работ, очистки или расширения русла рек, каналов и т. д.

(Энергетический бюллетень Министерства нефтяной промышленности, № 6, стр. 1, 1953. В. А. Гутерц.)



Продольный разрез пловучей электростанции.

1 — колонка для подвески высоковольтных кабелей; 2 — рулевая рубка; 3 — глушитель; 4 — водоохладитель; 5 — дизель; 6 — генераторы; 7 — трансформаторы собственных нужд; 8 — вентиляция; 9 — аккумуляторная; 10 и 11 — стоки пресной воды; 11 — баллон сжатого воздуха; 12, 14 и 15 — топливные отсеки; 13 — масляный отсек; 16 — водонепроницаемая платформа.

ворит потребностям нефтяной промышленности. В качестве пловучей базы для экспериментальной установки была взята несамоходная сухогрузная металлическая малогабаритная баржа грузоподъемностью 400 т. Экспериментальное выполнение, естественно, вызвало некоторые вынужденные решения при проектировании в отношении первичного двигателя.

Установка основного оборудования видна на рисунке. В каждом из основных отсеков баржи размещено по одному дизель-генератору мощностью 1000 л. с. каждый. Все необходимое тепломеханическое и электротехническое оборудование (топливные и масляные насосы, сепараторы, компрессоры, баллоны сжатого воздуха, водоохладители, отопительный котел, щит собственных нужд, щит освещения, автоматы гашения поля, пожарные насосы, осушительные насосы и т. д.) установлено по бортам машинных отделений. Запас пресной воды принят на 15 суток, топлива — на 10...15 суток и масла — на 30 суток.

Распределение электрической энергии предусмотрено при напряжении 6,3 кв. Генераторы подключены к комплексному распределительному устройству из шести ячеек с масляными выключателями на 300 а, разрывной мощностью 75 мвт. Масляные выключатели расположены на выкатных тележках. Для питания катушек масляных выключателей установлена щелочная аккумуляторная батарея с напряжением 30 в, вместе с соответствующим зарядным устройством. Другая аккумуляторная батарея, кислотная, напряжением 110 в предназначена для аварийного освещения. Она также имеет зарядное устройство и автоматический переключатель.

ПРИМЕНЕНИЕ ОПОР ИЗ ЦЕНТРИФУГИРОВАННОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОНА ДЛЯ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Опыт эксплуатации линий электропередач и связи на деревянных опорах, особенно в южных районах, показывает, что при небольших первоначальных затратах последующие расходы на ремонт и содержание этих установок намного превосходят первоначальные ассигнования.

Тбилисский научно-исследовательский институт сооружений и гидроэнергетики еще в 1932 г. выдвинул вопрос о замене деревянных и стальных опор для линий электропередачи опорами сборной конструкции из центрифугированного железобетона, однако лишь в 1948 г. началось строительство первых в СССР линий электропередач с такими опорами. Итоги работ 1948—1952 гг. доказывают, что линии электропередачи и связи на опорах из центрифугированного железобетона могут найти широкое распространение.

Основные достоинства таких опор, составляемые из отдельных секций, — долговечность, отсутствие необходимости в ежегодном ремонте, хорошая транспортабельность, простота изготовления секций, экономия металла.

Трест «Энергомонтажнефть» изготавливает железобетонные секции (трубы) длиной 3 и 6 м круглого сечения с наружными диаметрами 200, 300, 400 и 500 мм, с толщиной стенок секций 35...40 мм.

Опоры для линий электропередач с напряжением 6...10 кв могут составляться из двух или более секций при соединении их телескопически или с помощью вкладыша.

Применялись, например, опоры с общей высотой в 11,5 м при телескопическом соединении железобетонных секций диаметром 200 и 300 мм или 300 и 400 мм при длине каждой секции 6 м. Имеются конструкции и анкерных опор различных видов.

Промежуточные опоры для электропередач при напряжении 35 кв приняты порталного типа (П-образные), причем каждая стойка состоит из трех телескопически соединенных секций диаметром 300, 400 и 500 мм. Траверсы могут быть деревянные, металлические или железобетонные.

В заключение авторы в выводах указывают, что в целях выявления всех особенностей строительства и эксплуатации линий электропередач на опорах из центрифугированного железобетона намечено строительство таких линий не только в районах, где они уже имеются, но и в других. (Энергетический бюллетень Министерства нефтяной промышленности, № 6, стр. 6, 1953. И. К. Качан, Д. А. Марченко, Д. А. Розенберг, А. П. Анисимов, М. М. Берестецкий.)

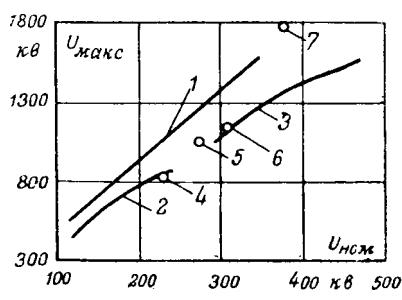
ЗА РУБЕЖОМ

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В КОНСТРУИРОВАНИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ ОЧЕНЬ ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Система глухого заземления нейтрали получила широкое распространение в электрических сетях высокого напряжения. При глухом заземлении нейтрали напряжение промышленной частоты на разрядниках по отношению к земле не может превысить 80% линейного напряжения. Это позволяет применять разрядники с лучшими защитными характеристиками, чем для тех же номинальных напряжений в сетях с компенсацией емкостного тока замыкания на землю, и снижает уровень изоляции сети. При глухом заземлении нейтрали оказывается возможным применение силовых трансформаторов со ступенчатой изоляцией. Все это в совокупности приводит к снижению стоимости оборудования.

В настоящее время между крупными капиталистическими державами достигнуто соглашение о глухом заземлении всех нулевых точек трансформаторов в электрических сетях с рабочим напряжением выше 220 кв.

Проведенные в различных странах исследования позволили принять более низкие уровни изоляции, чем это предполагалось ранее. В частности, принятые в США в 1941 г. стандартные импульсные уровни изоляции в дальнейшем были признаны завышенными и были пересмотрены в 1950 г. На рисунке приведены значения базисных уровней изоляции для напряжений до 230 кв, предложенные Американским институтом инженеров-электриков, и для напряжений выше 300 кв, предложенные Ф. Спорном и др. на основе результатов исследований, проведенных на опытной установке 500 кв Тидд. На рисунке показаны также уровни изоляции, принятые в некоторых, сооружаемых в настоящее время высоковольтных системах. По сравне-



Импульсные уровни изоляции.

1 — стандарт AIEE 1941 г.; 2 — предложение комитета AIEE 1950 г.; 3 — предложение Ф. Спорна и др.; 4 и 6 — вновь сооружаемых высоковольтных системах; 5 — в Англии; 7 — в Швеции.

нию с другими приведенными на рисунке значениями шведская система 400 кв имеет очень высокий импульсный уровень изоляции.

В настоящее время принято устанавливать уровни изоляции аппаратуры по отношению к наивысшему, а не к номинальному или эксплуатационному напряжению системы.

При испытании изоляции между витками или между катушками напряжением промышленной частоты может индуктироваться лишь часть напряжения, возникающая при перенапряжениях в условиях эксплуатации. Поэтому импульсное испытание обмотки является более универсальным, так как в этом случае подвергаются воздействию как главная, так и междувитковая и междукатушечная изоляция обмотки.

Современные методы обнаружения повреждений позволяют произвести оценку изоляции трансформаторов при приемке на основе осцилограмм тока и напряжения, полученных во время импульсных испытаний. Поэтому импульсные испытания приняты как типовые.

Необходимость обеспечения термической устойчивости, механической и электрической прочности обмотки выдвигает противоречивые требования к ее конструкции. Например, утолщение изоляции увеличивает электрическую прочность обмотки, но повышает ее нагрев. Поэтому принимаемые решения всегда являются компромиссом.

Возникающие в обмотке напряженности электрического поля при линейном распределении вдоль обмотки импульсного напряжения по отношению к земле имеют минимальную величину. Практически линейное распределение импульсного напряжения по отношению к земле достигается в нерезонирующих трансформаторах, выполняемых с цилиндрическими обмотками из дисковых катушек с полным экранированием. Однако изготовление таких обмоток для очень больших мощностей связано с серьезными техническими трудностями, так как при повышении уровня изоляции увеличивается нагрев обмотки.

Габаритные размеры трансформаторов диктуются импульсным уровнем изоляции и величиной реактивности трансформатора. При данных значениях уровня изоляции и реактивности вес и размеры трансформатора зависят от расстояния между обмотками высокого и низкого напряжений. Применяя другую конструкцию обмотки с меньшей шириной промежутка между обмотками, можно получить существенную экономию активных материалов. Главная изоляция обычно выполняется в виде цилиндрических барьеров из прессшпана или бумаги, с масляными каналами. В Германии и Швейцарии применяется сплошная бумажная изоляция между обмотками высокого и низкого напряжений. При этой конструкции пространство между обмотками, а следовательно, и вес и размеры трансформатора оказываются сравнительно небольшими.

Несмотря на хорошие качества трансформаторов такой конструкции, она не может считаться вполне удовлетворительной для очень высоких напряжений, так как толщина диэлектрика между обмотками высокого и низкого напряжений в этом случае должна быть достаточно большой, чтобы выдерживать импульсное напряжение, приложенное к линейному вводу. Многослойные концентрические обмотки выполняются в виде нескольких последовательно соединенных концентрических слоев. Присоединение к линейному вводу производится на верхнем цилиндрическом слое, начало внутреннего слоя заземляется наглухо.

Распределение емкости между слоями обмотки приводит к линейному распределению импульсного напряжения вдоль обмотки; ступенчатое расположение слоев от заземленной нейтрали к линейному концу позволяет снизить расстояние между обмотками высокого и низкого напряжений.

Обладая высокой электрической прочностью и хорошими условиями охлаждения, многослойная концентрическая обмотка механически недостаточно прочна, и для увеличения ее прочности приходится принимать специальные меры.

Связь двух электрических систем различных напряжений через автотрансформаторы создает серьезную проблему изоляции их обмоток, так как возникающие на первичных или вторичных зажимах автотрансформатора перенапряжения распределяются неравномерно вдоль последовательно соединенных частей обмотки. Наилучшее решение в этом

случае обеспечивает многослойная концентрическая обмотка.

В некоторых странах для очень высоких напряжений успешно разрабатываются конструкции силовых трансформаторов броневого типа. Изучение электрического поля дало возможность выбрать форму барьерной изоляции, обеспечивающую совпадение поверхности барьеров с эквипотенциальными поверхностями. Благодаря этому тенденция к поверхностному разряду снижается до минимума.

Обмотки таких трансформаторов состоят из нескольких катушек значительного радиуса, обладающих большой внутренней емкостью и малой емкостью по отношению к земле. Благодаря этому импульсное напряжение по отношению к земле распределяется линейно.

Хорошее охлаждение обмоток броневых трансформаторов достигается при вертикальном расположении катушек. При больших мощностях применяется принудительная циркуляция масла через обмотку.

Ниже приводятся краткие сведения относительно проектируемых и изготовленных за рубежом конструкций трансформаторов для очень высоких напряжений.

В Швейцарии разработана конструкция мощного однфазного трансформатора стержневого типа с цилиндрической обмоткой и дисковыми катушками, со сплющенной изоляцией между обмотками высокого и низкого напряжений.

В Бельгии сконструированы мощные трансформаторы броневого типа для очень высоких напряжений. Трехфазный трансформатор 300 кв, мощностью 100 тыс. ква может перевозиться по железной дороге в собранном виде, но без изоляторов.

В Франции изготовлены трансформаторы 220 кв с двойными концентрическими обмотками и дисковыми катушками. Опытные трансформаторы с многослойной обмоткой проходят испытания. Предполагается применение трансформаторов этого типа в проектируемой французской системе 300...400 кв.

В США широко распространена конструкция трансформаторов броневого типа (фирма Вестингауз). Изоляция современных трансформаторов при импульсных испытаниях выдерживает 1 550 кв при полной волне и 1 785 кв при срезанной волне. Однофазные трансформаторы 500 кв работают в опытной установке Тидд.

Заслуживает внимание то обстоятельство, что американская фирма GEC, производившая в течение 20 лет

нерезонирующие трансформаторы с цилиндрическими обмотками и дисковыми катушками, в настоящее время начала изготавливать стержневые трансформаторы с многослойными концентрическими обмотками. Трансформаторы этой конструкции выдерживают при импульсных испытаниях такие же напряжения, что и изготавляемые в Америке броневые трансформаторы.

В Англии и ее доминионах потребность в трансформаторах для очень высоких напряжений возникла лишь недавно. Работа над конструкцией трансформаторов идет в двух направлениях. Часть конструкторов отдает предпочтение многослойным концентрическим обмоткам. Для трансформаторов 220 кв и выше некоторые конструкторы применяют экранированные цилиндрические обмотки с дисковыми катушками. Современные броневые трансформаторы для очень высоких напряжений в Великобритании не разрабатываются.

В заключение автор указывает, что современный уровень знаний и возможности производства достаточны для создания мощных трансформаторов для любых напряжений, которые могут потребоваться для передачи электрической энергии в течение ближайших лет. Однако при этом автор оговаривает, что если в передаче на дальние расстояния не будет произведено коренных изменений, вряд ли потребуется строить трансформаторы на напряжение выше 400...500 кв. Развитие и усовершенствование грозозащитных устройств и снижение внутренних перенапряжений должны оказать существенную помощь конструкторам трансформаторов.

В дальнейшем будет быстро увеличиваться применение многослойных концентрических обмоток для трехфазных трансформаторов и в особенности для автотрансформаторов. В области очень высоких напряжений найдут широкое применение также броневые трансформаторы со ступенчатой изоляцией.

Улучшение характеристик магнитных материалов и применение принудительной циркуляции масла через обмотки, позволяющее улучшить использование обмоток, должны облегчить затруднения, связанные с перевозкой трансформаторов.

(E. C. Rippon, Proceed. IEE, т. 99, ч. I, № 115, стр. 18, 1952.)

Инж. А. И. ГЕРШЕНГОРН



Хроника

Научно-техническое совещание по сельской электрификации в Тбилиси

21—26 сентября 1953 г. Всесоюзной секцией сельской электрификации ВНИТОЭ совместно с Министерством сельского хозяйства и заготовок Грузинской ССР и Тбилисским филиалом ВИЭСХ было проведено научно-техническое совещание по вопросам электроэнергооборудования и автоматизации сельских электроустановок. В совещании приняли участие 240 делегатов из одиннадцати союзных республик и более 150 гостей — представителей общественных организаций, научно-исследовательских и учебных институтов, проектных и производственных организаций г. Тбилиси.

Целью совещания являлось обсуждение технических предложений по дальнейшему усовершенствованию нового электроэнергетического оборудования для электрификации сельского хозяйства и по внедрению автоматизации в сельские электроустановки, а также разработка ряда других вопросов во исполнение постановления сентябрьского Пленума ЦК КПСС «О мерах дальнейшего развития сельского хозяйства СССР», в части электрификации сельского хозяйства.

6 Электричество № 12.

Доклад о развитии электрификации сельского хозяйства СССР сделал кандидат эконом. наук С. В. Шуров. С докладом о научно-исследовательской работе в промышленности по созданию нового электроэнергооборудования для сельской электрификации выступил вице-президент Академии наук Армянской ССР доктор техн. наук, проф. А. Г. Иосифян. О развитии сельской электрификации в Грузинской ССР сообщил кандидат техн. наук Г. Д. Ананияшвили.

Всего на совещании было заслушано 28 докладов и сообщений и 31 выступление с мест. Всесторонней критике была подвергнута деятельность различных организаций, ведущих работы по электрификации сельского хозяйства и конструирующих и изготавливающих оборудование для электрификации сельскохозяйственного производства. В обсуждении докладов и сообщений приняли участие представители Министерства сельского хозяйства и заготовок СССР, Министерства электростанций и электропромышленности СССР, Энергетического института им. Кржижанов-

ского Академии наук СССР, Всесоюзного научно-исследовательского института электрификации сельского хозяйства и его Тбилисского, Свердловского и Ленинградского филиалов, Московского института механизации и электрификации сельского хозяйства им. Молотова, Московской академии сельскохозяйственных наук им. Тимирязева, Энергетического института Академии наук Грузинской

ССР, Электротехнической лаборатории Академии наук Армянской ССР, Тбилисского и Киевского сельскохозяйственных институтов, различных промышленных предприятий, проектных, эксплуатационных и строительно-монтажных организаций. По рассмотренным вопросам были приняты решения.

Кандидат техн. наук А. М. ГАНЕЛИН

Электрическая тяга на однофазном токе промышленной частоты

В мае 1953 г. в Москве состоялась конференция, посвященная вопросам новой системы электрической тяги на однофазном токе промышленной частоты.

Секцией по научной разработке проблем транспорта Отделения технических наук Академии наук СССР совместно с Всесоюзным научно-исследовательским институтом железнодорожного транспорта в период 1949—1950 гг. было проведено сопоставление различных систем электрической тяги для выбора перспективной системы электрификации железных дорог СССР. При сопоставлении был использован обширный научно-исследовательский и проектный материал, накопленный в СССР при более ранних разработках новых систем электрической тяги (работы под руководством члена-корр. АН СССР, проф. М. А. Шаталена с 1935 г. и члена-корр. АН СССР, проф. А. Б. Лебедева с 1939 г. до 1941 г.). Было выяснено, что наиболее перспективной и прогрессивной является система электрической тяги на однофазном токе промышленной частоты 50 Гц, которая позволяет значительно упростить и уменьшить устройства электроснабжения. От тяговых подстанций при такой системе возможно питание районной промышленной нагрузки, что обеспечивает нужды электрификации районов, прилегающих к электрическим железным дорогам, и имеет большое народнохозяйственное значение. Кроме этого данная система в наибольшей степени содействует задачам развития железнодорожного транспорта, открывая возможности: а) повышения весов составов до 4000 т и более; б) повышения скоростей движения на руководящем подъеме; в) вписывания больших мощностей в габариты электровоза; г) выполнения различных видов электровозов с различными характеристиками; д) уменьшения эксплуатационных расходов.

Конференция, созданная для обсуждения итогов работ, выполненных в этой области в течение нескольких лет, наметила ряд новых вопросов и направлений в разработке данной темы. В работе конференции приняли участие научные работники институтов АН СССР, Министерства путей сообщения СССР, МЭИ им. Молотова, ЛПИ им. Калинина, МЭМИИТ и других вузов, работники проектных организаций и представители главных управлений МПС СССР и МЭСЭП СССР.

С вступительным словом на пленарном заседании конференции выступил председатель Секции по научной разработке проблем транспорта ОТН АН СССР член-корр. АН СССР В. В. Звонков, подчеркнувший значение правильного разрешения рассматриваемой конференцией проблемы, поскольку выбор и внедрение новой системы электрической тяги определяет развитие электрифицированного железнодорожного транспорта на многие годы.

Инж. С. С. Калинин (быв. гл. управление электрификации железных дорог МПС) в докладе «Электрификация железных дорог и ее перспективы» ознакомил участников конференции с ходом выполнения плана электрификации и указал, что внедрение системы электрической тяги на однофазном токе 50 Гц даст возможность в несколько раз повысить ежегодный ввод электрифицированных участков в эксплуатацию.

Доктор техн. наук, проф. Д. К. Минов (МЭИ им. Молотова) в своем выступлении пояснил, что опытная проверка системы заключается в отработке в эксплуатационных условиях на опытном участке системы в целом и ее отдельных, наиболее ответственных узлов: электровозов, электроснабжения тяги и прилегающего района, защиты

линий связи от мешающего влияния тяговых токов и нового устройства СЦБ.

Член-корр. АН СССР, проф. М. П. Костенко познакомил участников конференции с последними данными зарубежного опыта и критически рассмотрел работы, проводящиеся в настоящее время у нас и за границей в области электровозостроения.

Доклады по различным видам электровозов однофазного тока и по коллекторным тяговым двигателям были заслушаны на секции «Подвижной состав электрических железных дорог однофазного тока 50 Гц». Заседания этой секции открылись выступлением проф. М. П. Костенко, посвященным коллекторным тяговым двигателям однофазного тока. Затем обсуждался доклад проф. Д. К. Минова по работе МЭИ «Исследование основных параметров электрических схем электровоза с ртутными преобразователями». В резолюции секции по этим вопросам было отмечено, что независимо от использования результатов работы МЭИ при проектировании опытных электровозов необходимо продолжить исследования по электровозам однофазно-постоянного тока (в частности, по вопросу применения рекуперативного и реостатного торможения, фильтров для снижения процента гармоник на стороне переменного тока) и углубить изучение вопросов коммутации тягового двигателя при пульсирующем напряжении.

Более подробно ознакомил участников конференции с проектом опытного электровоза с ионными преобразователями кандидат техн. наук Б. Н. Тихменев (МЭСЭП). Кандидат техн. наук Б. П. Петров (МЭИ) посыпал свое сообщение итогам испытаний электрического оборудования и тяговых свойств электровоза II-КО-1 для торфопредприятий. Он ознакомил конференцию с данными эксплуатации и техническими показателями первого в мире промышленного ртутно-выпрямительного электровоза.

В обсуждении состоявшихся на секции докладов приняли участие проф. Б. М. Шляпошников (Пензенский индустриальный институт), кандидат техн. наук А. В. Воронин (ЦНИИ МПС), кандидат техн. наук А. М. Шемаев (ВЭИ), кандидат техн. наук А. А. Терехов (АН СССР), кандидат техн. наук В. А. Беляков (ЛПИ), член-корр. АН СССР М. П. Костенко инж. А. А. Рабинович (завод «Динамо» им. Кирова) и др. В прениях, в частности, был затронут вопрос об оптимальном напряжении выпрямленного тока, так как, с одной стороны, повышение напряжения уменьшает количество вентиляторов, облегчает их охлаждение и повышает к. п. д. электровоза, а с другой стороны, при повышении напряжения увеличивается вес двигателей и снижается надежность вентиля.

Конференция отметила необходимость проектирования электровоза с тяговыми двигателями, работающими при более низком напряжении, чем то, которое было принято в проекте, рассмотренном секцией.

На секции был заслушан также ряд докладов, посвященных электровозам с асинхронными и коллекторными тяговыми двигателями. В резолюции по докладам доктора техн. наук, проф. В. Е. Розенфельда «Выбор схемы электровоза однофазно-трехфазного тока», доктора техн. наук, проф. А. С. Димитрадзе «Опыт эксплуатации электровозов с трехфазными асинхронными двигателями», кандидата техн. наук, доц. В. А. Белякова «Экспериментальное исследо-

вание коллекторного тягового двигателя» и кандидата техн. наук Л. М. Шильдинера «Схема однофазного коллекторного двигателя 50 гц» конференция отметила необходимость подготовки предложений по проектным, опытным и научно-исследовательским работам, связанным с созданием образцов мотор-генераторных электровозов и электровозов с коллекторными и асинхронными двигателями.

Секция «Энергоснабжение железных дорог, электрифицированных на однофазном токе 50 гц» обсудила вопросы, связанные с расчетами тяговой сети, с исследованием схем трансформаторов подстанций, с методикой расчета и снижением асимметрии напряжения как на шинах тяговых подстанций, так и в энергосистемах, с величиной мешающих влияний на линии связи и мерами защиты.

Об использовании межсистемных электрических линий для энергоснабжения электрических железных дорог и районных потребителей доложил кандидат техн. наук С. М. Рожков (ЭНИН им. Кржижановского АН СССР). Конференция признала необходимым расширить работу в этой области и привлечь к ней «Теплозаводпроект» МЭСЭП и Всесоюзный научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства.

Вопросы асимметрии в электрических линиях были освещены в докладе кандидата техн. наук В. И. Горушкина (ЭНИН АН СССР) и инж. З. Б. Голембо (ТЭП) «Методология расчета асимметрии токов и напряжений в различных точках энергосистем» и в докладе доктора техн. наук, проф. Л. Е. Эбина (ВИЭСХ) «Вопросы снижения асимметрии напряжения на районных шинах тяговых подстанций». При системе электрической тяги однофазного тока 50 гц оборудование тяговых подстанций ограничивается трансформаторами, от которых можно питать электроэнергией не только электротяговую контактную сеть, но и сельское хозяйство, местную промышленность и т. д. Однако наличие однофазной тяговой нагрузки нарушает симметрию и синусоидальность напряжения (при электровозах с ионными преобразователями) в питающей энергосистеме и у подсоединеных к трансформатору тяговой подстанции районных потребителей. Поэтому вопросы применения на тяговых подстанциях трехфазных, трехобмоточных трансформаторов, степень и влияние изменений асимметрии на работу энергосистем и районных потребителей (асинхронные двигатели) приобретают важное значение.

С асимметрией напряжения и ухудшением из-за этого качества электроэнергии тесно связан вопрос о содержании высших гармоник в кривой тягового тока, а также и в кривой первичного тока. О результатах исследования схем трансформаторов подстанций при наличии высших гармоник в кривой тягового тока сообщил в своем докладе кандидат техн. наук Б. Я. Гохштейн (ЦНИИ МПС).

На конференции было отведено значительное место вопросам электромагнитных влияний на связь и мерам защиты от них. На эту тему состоялись доклады доктора техн. наук М. А. Чернышева (ЦНИИ МПС) «Значение влияющих токов и мешающих напряжений контактной сети при различных схемах питания электровозов однофазного тока»; доктора техн. наук, проф. М. И. Михайлова (ЦНИИ МС)

«Меры защиты линий связи от влияния контактной сети однофазного тока» и инж. К. А. Любимова (НИИ КП) «Разработка кабеля связи для железнодорожных участков, электрифицируемых на переменном токе». В решении конференции по данному разделу было отмечено, что Всесоюзный научно-исследовательский институт связи Министерства связи СССР принимает недостаточное участие в научно-исследовательских работах по защите линий связи. Конференция одобрила работы по созданию кабеля связи с высоким защитным действием.

Для подготовки широкой электрификации железных дорог на однофазном токе 50 гц большое значение имеет разработка методов расчета системы электроснабжения. Работы в этой области проводятся специальными кафедрами Московского электромеханического института инженеров железнодорожного транспорта им. Дзержинского. С докладами на эту тему выступили доктор техн. наук, проф. К. Г. Маркварт (МЭМИИТ) «Методология расчета тяговой сети железных дорог однофазного тока» и инж. К. А. Парфенов (МЭММИТ) «Определение постоянных контактной сети без отсасывающих трансформаторов и с отсасывающими трансформаторами». В докладах были отмечены трудности, возникающие при расчетах мгновенной и длительной асимметрии, ввиду отсутствия полных показателей работы асинхронных двигателей и энергосистем при изменяющейся асимметрии, а также ввиду отсутствия допустимых величин колебаний напряжения для электровозов различных типов. Конференция отметила необходимость разработки данных вопросов.

К числу работ, подлежащих к проведению в ближайшее время, конференция отнесла: а) установление электрических характеристик для биметаллических проводов и рельсов для разных токов и разных частот; б) исследование проводимости рельсы-грунт в условиях, соответствующих работе магистральных железных дорог; в) исследование работы отсасывающих трансформаторов на железнодорожной линии, электрифицированной на однофазном токе 50 гц; г) разработка методики выбора мощности тяговых трансформаторов по условиям старения изоляции (доклад на эту тему был сделан кандидатом техн. наук П. К. Денисовым).

На секции был заслушан также доклад кандидата техн. наук М. А. Покровского (ЦНИИ МПС) «Исследование влияния тягового тока промышленной частоты на устройства СЦБ».

Подытожив свою работу, конференция подтвердила правильность идеи перехода на систему электрической тяги на однофазном токе и рекомендовала всем научно-исследовательским институтам и производственным организациям министерств, принимающим участие в исследованиях, разработке и опытной проверке новой системы электрической тяги на однофазном токе промышленной частоты, ускорить свои работы с тем, чтобы эта перспективная система тяги смогла найти широкое применение при электрификации железнодорожного транспорта Советского Союза.

Инж. Л. А. ЧЕРНОУСОВ
Секция по научной разработке проблем транспорта ОТН АН СССР

Академик Е. О. Патон

Советская наука понесла тяжелую утрату 12 августа 1953 г. в Киеве скончался выдающийся советский ученый и общественный деятель, депутат Верховного Совета СССР, Герой Социалистического Труда, лауреат Сталинской премии, заслуженный деятель науки и техники, действительный член Академии наук Украинской ССР, организатор и бессменный руководитель Института электросварки Академии наук УССР, доктор техн. наук, проф. Евгений Оскарович Патон.

Евгений Оскарович умер на 84 году жизни. Более 35 лет он посвятил мостостроению. По его проектам и под его руководством были сооружены десятки крупных мостов, в том числе цепной мост через Днепр в Киеве, мост через Куру в Тбилиси и многие другие. На классических трудах Е. О. Патона в области мостостроения обучались поколения русских, советских инженеров. Он создал кафедры мостостроения в Москве и Киеве; тысячи его учеников работают во всех уголках нашей необъятной Родины. Около 35 лет руководил Евгений Оскарович кафедрой мостов Киевского политехнического института; здесь он создал свою школу мостостроения, получившую широкую известность.

В возрасте 59 лет Е. О. Патон занялся электрической сваркой металлов. В 1929 г. он создал в Киеве в Академии наук УССР электросварочную лабораторию, преобразованную затем в Институт электросварки, носящий его имя. Классические работы Е. О. Патона в области электрической сварки металлических конструкций и сосудов сыграли огромную роль для закладки основ советской сварочной науки и оказали неоценимую услугу нашей Родине в период социалистической реконструкции народного хозяйства.

Общеизвестны заслуги Евгения Оскаровича в создании современного механизированного способа электрической сварки под флюсом. Исходя из того, что механизированной сварке принадлежит будущее, Е. О. Патон еще в предвоенные годы решительно и смело сосредоточил все силы Института электросварки на разработке этой проблемы.



Сварка по методу Патона сыграла важную роль в годы Великой Отечественной войны при изготовлении разных видов вооружения.

В период Великой Отечественной войны Евгений Оскарович Патон вступил в ряды Коммунистической партии Советского Союза.

За выдающиеся заслуги в области ускорения производства вооружения и металлоконструкций Советское правительство в 1943 г. присвоило Евгению Оскаровичу почетное звание Героя Социалистического Труда. Широкий размах автоматизации сварочных работ в нашем народном хозяйстве после войны в значительной мере был облегчен созданием Е. О. Патоном метода сварки под флюсом, удостоенного в 1941 г. Сталинской премии I степени.

Евгений Оскарович Патон написал свыше 300 научных работ и монографий и является одним из выдающихся авторов теоретических основ сварки металлов и создателем одной из крупнейших научных школ в этой области электротехники.

Вся трудовая жизнь Евгения Оскаровича была насыщена неутомимой деятельностью на благо нашей Родины. До конца своих дней он был скромным и требовательным к себе, верным и преданным сыном Коммунистической партии.

Евгений Оскарович всегда объединял вокруг себя и смело выдвигал талантливую научную молодежь.

Партия и правительство высоко оценили заслуги Евгения Оскаровича перед Советской Родиной. Он был награжден двумя орденами Ленина, орденом Отечественной войны I-й степени, двумя орденами Трудового Красного Знамени, орденом Красной Звезды и медалями.

Евгений Оскарович Патон отдал всю свою жизнь беззаветному служению Социалистическому Отечеству. Наш народ сохранил в своей памяти его светлый образ ученого-патриота.

Институт электросварки им. Е. О. Патона
Академии наук Украинской ССР

В. И. Петров

7 июня 1953 г. после тяжелой болезни на 47 году жизни скончался заместитель заведующего кафедрой электротехники и электрооборудования Московского высшего технического училища им. Баумана, канд. техн. наук Владимир Иванович Петров.

В. И. Петров много сделал для развития электрического привода в промышленности страны.

Наибольшего расцвета научная деятельность Владимира Ивановича Петрова достигла в период его работы в научно-исследовательских организациях. Во Всесоюзном электротехническом институте им. Ленина он возглавлял работу по электроприводу металлорежущих станков. При этом особое внимание им уделялось вопросам динамики электропривода, переходным процессам и регулированию скорости вращения. Его работы в этой области являются образцом научного подхода к решению практических задач.

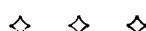
В экспериментальном научно-исследовательском институте металлорежущих станков (ЭНИМС) В. И. Петров создал лабораторию по электроприводу, где разрешение вопросов электрификации страны было поставлено на серь-

езную научную основу. Из многочисленных работ, выполненных В. И. Петровым в этот период, особое значение имеют его исследования в области теории нагрева электроприводов, механики привода и электроавтоматизации управления станков. Много сделал В. И. Петров и по созданию специальных типов электрических машин и аппаратов для машиностроения.

В последние годы своей жизни В. И. Петров работал в МВТУ им. Баумана, где проявил себя прекрасным педагогом. Его лекции пользовались неизменным успехом.

Имя В. И. Петрова, инженера, педагога, активного общественника, останется близким и дорогим широким кругом электротехников и машиностроителей.

Академик В. И. Дикушин, член-корр. АН СССР А. Н. Ларионов, доктор техн. наук, проф. С. А. Ринкевич, доктор техн. наук, проф. А. Т. Голован, канд. техн. наук, доц. О. Н. Браткова, проф. Б. Л. Богуславский и др.



Библиография

С. А. ЛЮТОВ. ИНДУСТРИАЛЬНЫЕ ПОМЕХИ РАДИОПРИЕМУ И БОРЬБА С НИМИ.

Изд. 3-е, переработанное. Допущено МВО в качестве учебного пособия для электротехнических и энергетических вузов и факультетов, стр. 320, ц. 9 р. 05 к. Госэнергоиздат, 1952.

Проблема борьбы с различного рода радиопомехами, в том числе и индустриальными, является в настоящее время одной из наиболее актуальных проблем современной радиотехники. Для подавления индустриальных радиопомех необходимо, в частности, проведение комплекса мероприятий у источников этих помех и в связанных с ними электросетях.

В проведении этих мероприятий должны участвовать не только радиоиспытатели, но и широкие круги электриков других специальностей.

Книга С. А. Лютова является, пожалуй, единственным пособием по данной области техники, если не считать отдельных брошюр, изданных до 1941 г. Впервые она была выпущена в 1945 г. тиражом в 5 000 экземпляров, переиздана в 1951 г. тиражом в 7 000 экземпляров и в 1952 г. тиражем в 10 000 экземпляров.

Если первое издание книги допускало некоторое снохождение именно потому, что оно было первым, то от последующих изданий мы вправе требовать много большего, тем более, что и техника борьбы с радиопомехами с 1945 г. (1-е издание) сильно шагнула вперед. Однако, несмотря на то, что объем книги во втором и особенно в третьем издании существенно возрос, изложение отдельных разделов книги все еще вызывает много замечаний.

Советские специалисты по борьбе с индустриальными радиопомехами, в том числе и авторы настоящей рецензии, бесспорно повинны в том, что они после выхода в свет первых двух изданий этой книги не выступили с ее критикой. В краткой рецензии мы вынуждены ограничиться рассмотрением лишь основных недостатков.

Общая беспорядочность композиции заметна уже в главе первой «Природа индустриальных помех и влияние их на радиоприем». В ней нужно было бы последовательно рассмотреть вопросы происхождения, распространения помех и механизма их воздействия на радиоприемники. Однако на деле этого не получилось. § 1-3, трактующий о связи приемника с источником помех, оказывается вклиниенным между § 1-2 и 1-4, излагающими вопросы о природе сплошного спектра и характере индустриальных помех. Вопрос о распространении помех по электрическим сетям, который, совершенно очевидно, является одним из вопросов связи источников помех с радиоприемниками, почему-то излагается в § 2-1 и 2-2 второй главы, а вопрос о коэффициенте переноса помех из электросетей в антены попадает в § 2-6 той же главы. Зато в главу первую попадают два параграфа — 1-7 и 1-8, не имеющие к ней отношения. В § 1-7 приводятся нормы предельно допускаемых индустриальных радиопомех, что совершенно неуместно делать до изложения вопроса о распространении помех по сетям и о коэффициенте переноса, когда читателю еще неизвестно, например, существуют ли напряжения помех между зажимами источника помех и его корпусом и почему нормируются эти напряжения, а не напряжения между зажимами. В § 1-8 излагается вопрос о методах борьбы с помехами, которому следовало бы посвятить самостоятельную главу.

Глава третья носит название «Защитные конденсаторы», а глава четвертая — «Защитные катушки индуктивности». В эти главы попадают § 3-7 и 4-4, трактующие о параллельном и последовательном включении катушек и дросселей, что является скорее одним из вопросов фильтротростроения. Зато вопросы о высокочастотных характеристиках полного сопротивления конденсаторов и дросселей выделяются в два параграфа, отделенные от этих глав и вынесенные зачем-то в самостоятельную главу пятую.

В главе девятой, не рассмотрев сколько-нибудь серьезно вопроса о принципе действия и о схемах современных измерителей помех и уделив всего около одной страницы более чем краткому описанию блок-схемы современного измерителя, автор переходит к вопросу об основных факторах, влияющих на точность измерителей помех (§ 9-2) — наиболее сложному и наименее изученному вопросу техники измерения, который никак нельзя рассматривать до ознакомления читателя с принципом действия и схемами измерителей.

Противоречия и теоретические ошибки обнаруживаются уже в самом начале первой главы. В ней сказано, что «...помехи являются результатом возникающих свободных колебаний при наличии резких изменений тока и напряжения в цепях различных электрических аппаратов» (стр. 7). Несколько строчками ниже читаем разъяснение, что «Так как почти всякая электрическая система обладает емкостью, индуктивностью и активным сопротивлением, то переход от одного вынужденного режима к другому всегда сопровождается затухающими свободными колебаниями. Эти колебания создают (разрядка наша) непрерывный спектр частот, амплитуды напряжений которого убывают с повышением частоты».

Приведенные две цитаты дают неверное объяснение природы помех. В них возникновение помех объясняется свободными колебаниями в электросхемах, хотя известно, что переход системы от одного вынужденного режима к другому отнюдь не всегда сопровождается затухающими свободными колебаниями, а может быть апериодическим, что, однако, не исключает возникновения радиопомех. Всякое электромагнитное возмущение в схеме независимо от его характера эквивалентно появлению в соответствующем месте этой схемы генератора сплошного спектра. Высокочастотные (радиочастотные) слагающие этого спектра и есть радиопомехи.

На стр. 9 автор для объяснения сплошного характера спектра помех, игнорируя труды выдающихся отечественных ученых, приводит примитивную «теорию», некритически заимствованную им из статьи В. Вилда „Ein Gerät zum Messen des Frequenzspektrums von Rundfunkstörungen“, опубликованной в ETZ в 1933 г.

В § 1-3 вопрос о связи приемника с источником помех рассматривается неправильно. Чтобы доказать емкостный характер этой связи, автор ссылается на диполь Герца и приводит выражения для слагающих его поля, не доказав, что источник можно в первом приближении рассматривать как диполь. С таким же успехом можно было бы, очевидно, доказать и индуктивный характер этой связи, заменив источник в первом приближении элементарной рамкой (магнитным диполем). Анализ показывает, что многие источники действительно создают поля типа рамки.

На стр. 31 читаем: «Кроме описанных выше активных устройств, снижающих помехи, следует указать на использование антени направленного действия...». За последнее время получила распространение комнатная рамочная антenna в виде одного квадратного витка, подвешенного под потолком вдоль стен комнаты». Здесь две ошибки. Во-первых, рамка, расположенная в горизонтальной плоскости («под потолком вдоль стен»), не обладает в этой плоскости направленностью; во-вторых, подвешивание рамки указанным образом, т. е. в непосредственной близости от электропроводки, может привести лишь к усилению помех. Наконец, ошибочно и самое утверждение автора, что такая антenna за последнее время получила распространение.

На стр. 93 ошибочно утверждение, что у проходного конденсатора на частотах выше 15 мгц «входное сопротивление конденсатора равно характеристическому сопротивлению линии». Нельзя забывать о значительном индуктивном сопротивлении ввода, которое много больше на этих частотах, чем характеристическое сопротивление линии, эквивалентной конденсаторной галете.

На стр. 102 автор утверждает, что электролитические конденсаторы «могут быть использованы для фильтрации помех в длинноволновой части радиовещательного диапазона, где полное сопротивление их значительно меньше, чем сопротивление бумажных конденсаторов емкостью 1 мкФ», и ссылается в доказательство на фиг. 3-18, которую сравнивает с фиг. 3-14. Однако вопреки утверждению автора фиг. 3-18 доказывает не целесообразность, а бесполезность применения электролитических конденсаторов в технике подавления радиопомех.

Ошибочны и противоречивы приведенные в § 7-5 соображения о преимуществах биметаллических и многослойных экранов. Автор утверждает, что в области высоких частот многослойные экраны всегда лучше однородных. Из кривой фиг. 7-15 следует даже, что наивыгоднейшей в области радиочастот является независимо от общей толщины комбинация медь (10—12%) — сталь (90—88%). Однако до тех пор, пока толщина экрана много меньше толщины поверхностного слоя, однородный экран из материала, обладающего наибольшей проводимостью, лучше любого многослойного экрана. В этом нетрудно убедиться, пользуясь цифрами, приведенными самим С. А. Лютовым в табл. 7-3 и 7-5. Между прочим, характерно, что в табл. 7-3 приведены значения \mathcal{E} для частот до 100 мгц, а в табл. 7-5 — лишь до 0,15 мгц. Если продолжить табл. 7-5 в область более высоких частот, то мы быстро убедимся в том, что на частотах порядка нескольких мегагерц и выше стальной экран в 0,2 мм гораздо лучше биметаллических с толщиной слоев по 0,1 мм. Но так как такой вывод не устраивает автора, то он, видимо, предпочел сократить таблицу.

На фиг. 7-14 автор, приводя для сравнения кривые зависимости \mathcal{E} от частоты для однородных и биметаллических экранов, почему-то оставляет в тени то обстоятельство, что его однородные экраны имеют толщину 0,1 мм, а биметаллические $2 \times 0,1$ мм, вследствие чего сравнение непоказательно.

На стр. 190 мы читаем: «Применительно к коаксиальному кабелю можно эффективность экранирования $\mathcal{E} = \frac{E^o}{E^s}$ выразить через соотношение напряженности поля на внутренней E_z^o и внешней E_z^s поверхностях внешнего провода (экрана):

$$\mathcal{E} = \frac{E^o}{E^s} = \frac{E_z^o}{E_z^s}.$$

Как видим, \mathcal{E} не выражается «через», а принимается равным указанному отношению, т. е., иными словами, эффективность экранирования принимается равной ослаблению поля в толще металла. Такое определение \mathcal{E} ошибочно, так как приводит нас к выводу, что если $f \rightarrow 0$, то $\mathcal{E} \rightarrow 1$, тогда как в действительности даже при $f = 0$ замена открытой однопроводной линии концентрическим кабелем весьма существенно ослабляет поле в окружающем пространстве. Следует отметить, однако, что, приведя несколько формул, автор на стр. 192 пишет: «Сравнивая приведенные формулы расчета эффективности экранирования коаксиальных и симметричных цепей, можно отметить, что в коаксиальном кабеле экранирующий эффект обусловлен лишь затуханием в металле». Автор уже знал, что он сам произвольно и ошибочно ввел такое определение эффективности экранирования, и хочет уверить читателя, что оно появилось закономерно в результате математического анализа.

На стр. 257 спутаны понятия, связанные с измерением помех в антenne. Интенсивность помех в антenne характеризуется мешающей э. д. с. в антenne (э. д. с. генератора, эквивалентного антenne). Эта э. д. с. принципиально может быть измерена путем подключения к антenne

измерителя с бесконечно большим внутренним сопротивлением. Практически измеритель имеет конечное входное сопротивление Z_{ex} , вследствие чего при подключении его к антenne он регистрирует не истинное значение э. д. с. \mathcal{E}_A , а величину \mathcal{E}'_A , равную:

$$\mathcal{E}'_A = \mathcal{E}_A \frac{Z_s + Z_{ex}}{Z_s + Z_{ex}},$$

где Z_s — сопротивление эквивалента антены, с которым производилась градуировка измерителя.

Z_A — сопротивление антены.

Для простоты обычно условно полагают $\mathcal{E}_A = \mathcal{E}'_A$. Напряженность электрического вектора поля всегда из-

меряется в в/м, мв/м или мкв/м независимо от d и от $\frac{d}{\lambda}$.

Если размеры антены много меньше расстояния от источника поля, то поле независимо от $\frac{d}{\lambda}$ можно считать в месте расположения антены однородным. Тогда при соответствующей ориентации антены $\mathcal{E}_A = h_0 E$, где E — напряженность поля, а h_0 — действующая высота. Напротив, если размеры антены и источника одного порядка или больше расстояния от антены до источника, то поле опять-таки независимо от $\frac{d}{\lambda}$ нельзя считать во всем месте расположения антены однородным, и тогда по величине \mathcal{E}_A нельзя простым способом определить E . В таких случаях на основании результатов измерений можно говорить лишь о величине \mathcal{E}_A .

На стр. 242 автор пишет, что выбор одинакового для всех измерителей помех отношения длительности импульса ко времени заряда, т. е., иными словами, одинакового произведения ширины полосы пропускания на постоянную времени заряда, «обеспечивает некоторую компенсацию разницы полос в различных участках диапазона при измерениях одиночных или редких импульсов радиопомех». Это утверждение ошибочно. При расширении полосы пропускания длительность импульса на выходе усилителя промежуточной частоты измерителя уменьшается, а пиковое значение его почти во столько же раз возрастает; поэтому, если оставить постоянную времени заряда неизменной и исключить перегрузку, то показания измерителя при измерении одиночных импульсов помех практически не изменяется, а при измерении серии импульсов возрастают. Если уменьшить постоянную времени обратно пропорционально полосе пропускания, то показания измерителя возрастают еще больше.

На стр. 231—233 описываются устаревшие, в настоящее время не применяемые методы измерения помех. Вместе с тем совсем не освещены такие очень важные вопросы, как: а) зависимость формы спектра помех от формы мешающего импульса; б) характер полей помех различных источников и связь между интенсивностью поля непосредственного излучения и интенсивностью помех, распространяющихся вдоль проводов; в) случайный характер интенсивности помех и коэффициентов переноса и применение методов теории вероятностей при изучении этих величин; г) связь теории помехоподавляющих фильтров с общей теорией четырехполюсников и фильтров; д) расчет дросселей с ферромагнитным сердечником, имеющим зазор; е) устройство экранных камер.

Следует также отметить ряд недостаточно освещенных вопросов: а) физическая сущность сплошного спектра; б) классификация способов борьбы с помехами; в) характер и порядок величин сопротивлений источников помех и помехонесущих электросетей; г) правила конструктивного выполнения помехоподавляющих фильтров; д) роль заземления в технике подавления помех и требования к заземлениям.

Приведем примеры произвольных терминов и классификации. На стр. 16 читаем: «Все индустриальные помехи по своему характеру можно разбить на две группы: 1) равномерные и 2) неравномерные. Однако общепринято разделение помех на гладкие и им-

пульсные. Фиг. 1-6, 1-7, 1-8 и 1-9, приводимые самим С. А. Лютовым (стр. 17, 18), хорошо иллюстрируют надуманность вводимой им классификации. Действительно, с точки зрения прохождения через тракт радиоприемника и измерителя помехи фиг. 1-7 и 1-8, относимые им к разным классам, должны быть отнесены в одну общую группу импульсных помех, а помехи фиг. 1-6 и 1-9, то же относимые им к разным классам, должны быть отнесены в одну группу гладких помех.

Некритически заимствуя термин из статьи Лейтерера Strom und Spannungsverteilung im randverbanden Kondensatorwickel ENG (июль 1943), автор называет отношение выходного напряжения ко входному току проходного конденсатора «основным сопротивлением» этого конденсатора (стр. 88), хотя из физических соображений это сопротивление следовало бы назвать «сопротивлением связи» (по аналогии с сопротивлением связи экранирующей оболочки концентрического кабеля).

Кривые фиг. 5-3 (стр. 129) и 5-9 (стр. 135) построены в каком-то произвольном, надуманном масштабе по горизонтальной оси, который не только не облегчает, а, напротив, затрудняет понимание. Следовало применить и здесь двойной логарифмический масштаб, как это сделано в других аналогичных фигурах.

Автор пишет: «...все фильтры... могут быть разбиты на две основные группы: на приставные фильтры и фильтры профилактической защиты источников помех» (стр. 138). Такая классификация совершенно неправильна и является результатом смешения автором двух вопросов. По конструктивному оформлению фильтры делятся на конструктивно связанные с источником помех и приставные, выполняемые в виде самостоятельных конструктивных элементов. И те и другие могут применяться как в порядке предупредительного (профилактического) помехоподавления, так и при подавлении помех от фактически выявленных источников, хотя в последнем случае более вероятно применение приставных фильтров.

«По конструкции экраны классифицируются на цилиндрические, сферические и плоские» (стр. 167). Правильно было бы сказать, что для расчета их эффективности многие реальные экраны сводятся путем идеализации к сферическим, цилиндрическим и плоским.

Примерами небрежных выражений и небрежного оформления графического материала может служить следующее:

«...чем большая параллельность будет между...» (стр. 16). Ясно, что параллельность не может быть большей или меньшей.

«...найдено, что ухо воспринимает импульсы, возникающие со скоростью от 0,5 до 1 мсек» (стр. 18). Скорость не может измеряться в мсек. Смыл фразы непонятен.

«Всякое сопротивление в диапазоне частот может носить как индуктивный, так и емкостный характер, т. е. при определенной частоте будет иметь резонанс и далее, изменение знака сопротивления». (стр. 66).

«...Без опасения за их порчу...» (стр. 79).

На фиг. 7-9 (стр. 179) не указаны радиус экрана и частота, для которых даны кривые. На фиг. 7-10 (стр. 179) не указаны радиус экрана, его толщина и частота, для которых даны кривые. На фиг. 7-16 (стр. 189) не указаны радиус экрана и частота, для которых даны кривые; не сказано также, что изображает собой каждая из трех кривых. На фиг. 7-22 (стр. 195) ошибочно указано, что по вертикальной оси отложены значения сопротивления в м²ом/м.

Номера фиг. 8-10 и 8-11 (стр. 225) перепутаны (во всех трех изданиях!).

«Эта эквивалентность понимается как результат одинаковых показаний...» (стр. 230).

Все изложенное выше позволяет сделать следующее заключение: 1. Книга С. А. Лютова «Индустриальные помехи радиоприему и борьба с ними» все еще не соответствует высоким требованиям, какие предъявляются к пособиям для работников промышленности и для учебных заведений. 2. Необходимо скорейшее создание действительно полноценного пособия по технике подавления индустриальных радиопомех для вузов, техникумов и работников промышленности.

Ф. Э. ИЛЬГЕКИТ, Д. Н. ШАПИРО, Л. А. ФОМЕНКО

Центральная лаборатория по борьбе с индустриальными радиопомехами МЭСЭП СССР

М. А. КАРПИНСКИЙ
Ленинградский электротехнический институт

А. А. ФЕРСМАН, В. П. ПЕВНИЦКИЙ
Ленинградское высшее мореходное училище

ОТ АВТОРА КНИГИ

Автор согласен с целесообразностью обсуждения ряда замечаний по вопросам расположения материала в книге.

Касаясь приведенных в рецензии примеров противоречий и теоретических ошибок, следует заметить следующее:

1. Рецензенты объявляют неверным данное на стр. 7 объяснение природы радиопомех. Повидимому, при этом не учитывается, что апериодические колебания это тоже затухающие колебания и что свободными колебаниями могут быть названы колебания, существующие некоторое время даже после выключения из схемы источника тока.

2. Диполь Герца изучается в других курсах; в них приводятся и те доказательства для электрических систем, которые требуют рецензентов. Нельзя все начинать сначала. Автор считает вполне достаточными те указания по этому вопросу, которые даны в книге (§ 1-3).

3. По поводу рамочной антенны (стр. 31). На антенны приемников оказывает воздействие электрическая составляющая поля диполя. При распространении радиоволн вдоль поверхности земли горизонтальная составляющая поля резко затухает по сравнению с вертикальной составляющей поля. В результате этого от источника помех, обладающего произвольной поляризацией, в месте приема остается помеха с преимущественно вертикальной поляризацией. Поэтому, если к приемнику подключить антенну, хорошо принимающую горизонтальные поляризованные волны и не принимающую вертикально поляризованные

волны, то напряжение помех на входе приемника от такой антенны будет незначительным. Что же касается полезного сигнала, то при распространении пространственных волн обе поляризации являются примерно равнозначными, поэтому такая антenna будет хорошо принимать пространственные волны с горизонтальной поляризацией. Описанная в книге рамочная антenna является магнитной антенной, хорошо принимающей лишь горизонтально поляризованные волны, поэтому она обеспечивает хорошее подавление помех с вертикальной составляющей поля. Эффективность такой антены, конечно, невысока, но при существующей чувствительности приемников это не является серьезным недостатком.

4. К стр. 102. Рецензенты здесь ошиблись: типичная кривая конденсатора 100 мкф приведена рядом на рис. 3-17; частота его резонанса лежит гораздо ниже 0,1 мгц. Кроме того, не следует принимать всякий минимум в кривой напряжения радиопомех за минимум, появившийся в результате резонанса конденсатора.

5. По части многослойных экранов (§ 7-5) рецензентами допущен ряд ошибок. Их стремление опровергнуть эффективность многослойных экранов не обосновано. Многослойный экран, составленный из диамагнитных ферромагнитных материалов, эффективнее, чем однородный экран соответствующей толщины. Между толщинами слоев комбинированного экрана имеется определенное соотношение,

при котором обеспечивается наивыгодный экранирующий эффект. Исходя из экранирующих параметров и потерь в экране, необходимо диамагнитные слои располагать по наружным поверхностям. Оптимальное значение толщины диамагнитных и ферромагнитных слоев с изменением частоты существенно меняется. С ростом частоты уменьшается толщина диамагнитных слоев и увеличивается толщина ферромагнитных слоев. На радиочастотах может оказаться невозможным практически реализовать это оптимальное условие, так как практически трудно получить очень тонкие слои меди.

$$6. \text{ Приведенное на стр. 190 выражение } \mathcal{E} = \frac{E_z^s}{E_z^c} \text{ от-}$$

носится к экранированию электромагнитных полей коаксиального кабеля. При $f \rightarrow 0$ необходимо учитывать также эффект электростатического экранирования коаксиального кабеля, который при $f \rightarrow 0$ имеет существенное значение. Приведенное на стр. 192 положение о том, что в коаксиальных кабелях эффект экранирования обусловлен лишь затуханием в металле, вполне обосновано и математически и физически.

7. По поводу замечаний к стр. 257 книги. Вводимый здесь рецензентами новый термин «э. д. с. в антенне» крайне неудачен. Он предлагался Д. Н. Шапиро взамен существующего термина «уровень поля» на междуведомственном совещании по обсуждению проекта норм предельно допустимых радиопомех в апреле 1953 г. и был совещанием забракован.

8. Замечания в отношении материала на стр. 231—233 правильны. Эти две страницы действительно посвящены устаревшим методам измерения радиопомех. Но автор считал необходимым очень кратко сказать о них прежде, чем перейти к современным методам измерений, так как в эксплатации еще имеется некоторое количество устаревшей аппаратуры. Кроме того, этот небольшой обзор дает представление о том, в каком направлении развивалась аппаратура для измерения радиопомех.

9. Приведенное на стр. 9-й объяснение образования непрерывного спектра периодического источника радиопомех при помощи ряда Фурье является известным и наиболее наглядным. Вопреки предположению рецензентов автор использовал отечественную литературу при написании книги, что следует из приложенного к книге списка литературы.

Рецензенты указывают, что в книге не освещены «очень важные вопросы». Отвечу по пунктам:

а) Вопрос о зависимости формы спектра помех от формы мешающего импульса освещен в книге в той мере, в которой он необходим для техники борьбы с помехами. Студентами радиотехнических факультетов он изучается более подробно в специальных курсах.

б) Связь между интенсивностью поля непосредственного излучения и интенсивностью помех, распространяющихся вдоль проводов, в каждом частном случае будет зависеть от степени экранирования источника радиопомех, о чем в книге неоднократно указывается. Эта связь становится определенной только для вполне определенного источника радиопомех и его проводки и легче всего ее установить экспериментально. Поле радиопомех, создаваемое простыми помехонесущими проводками, вполне определено и этот вопрос достаточно подробно освещен в разделе книги о коэффициенте переноса.

в) Теория вероятности, когда это необходимо, применяется в любой отрасли техники; причем в технике борьбы с радиопомехами она применяется не чаще, чем в какой-либо другой, поэтому автор не считал необходимым отдельно останавливаться на этом вопросе.

г) Писать о связи теории помехоподавляющих фильтров с общей теорией четырехполюсников нет необходимости, так как использование теории четырехполюсников при расчете помехоподавляющих фильтров приведет лишь к усложнению расчетов.

д) Вопросы расчета дросселей, в частности с ферромагнитным сердечником, имеющим зазор, достаточно хорошо освещены в литературе. Поэтому на расчете дросселей автор счел возможным остановиться весьма кратко.

е) На устройстве экранных камер автор не остановился особо, имея в виду большой опыт, накопленный промышленностью по устройству таких камер.

10. По поводу произвольных терминов и классификации необходимо заметить следующее.

Классификация индустриальных радиопомех (стр. 16) на «равномерные» и «неравномерные» давно принята на практике и дает возможность более полно охарактеризовать импульсные и гладкие радиопомехи.

Отношение входного напряжения к входному току у проходного конденсатора называется основным его сопротивлением (стр. 88). Характеристикой этого сопротивления в зависимости от частоты пользуются при расчете фильтров так же, как и характеристиками обычных конденсаторов. Предлагаемая рецензентами замена термина «основное сопротивление» на термин «сопротивление связи» всегда будет ставить перед обучающимися вопрос: где же основное сопротивление? Помимо всего предлагаемая аналогия с сопротивлением связи экранирующей оболочки концентрического кабеля является надуманной. Термин «основное сопротивление» является для всех понятным и к тому же принят на практике.

Масштаб, примененный при построении кривых (стр. 129), нередко применяется в технике. У нас он принят с целью более четкого показа подведения кривых вблизи резонанса.

В технике борьбы с индустриальными радиопомехами принято классифицировать фильтры (стр. 138) на приставные фильтры и фильтры профилактической защиты. Приставные фильтры могут быть применены и для профилактического подавления радиопомех. Под фильтрами профилактического подавления радиопомех подразумеваются фильтры, предназначенные непосредственно для данного электрического механизма (источника радиопомех) и представляющие одно целое с ним. Указанная классификация принята на практике и до сих пор ни у кого сомнений не вызывала.

Классификация конструкций экранов на цилиндрические, сферические и плоские (стр. 167) является общепринятой. Использование при расчете формул цилиндрических, сферических и плоских экранов, рекомендуемое в книге, допустимо в связи с тем, что конструктивная форма экранов сравнительно мало влияет на их экранирующие характеристики.

11. Замечания рецензентов по поводу небрежных выражений и небрежного оформления графического материала справедливы и вызваны в основном опечатками и пропусками, а также невниманием автора и редактора книги.

В заключение необходимо отметить неправильное отношение к задаче создания полноценной книги по технике подавления индустриальных радиопомех и со стороны авторов напечатанной выше рецензии. Автор книги обратился к ним с просьбой сообщить свои замечания по второму изданию книги в связи с подготовливавшимся третьим изданием, но получил отказ, хотя рецензия на второе издание в ЦЛИР была уже в то время составлена.

Инж. С. А. ЛЮТОВ



К ВОПРОСУ О СОЗДАНИИ ИНЖЕНЕРНОГО ПОСОБИЯ ПО БОРЬБЕ С РАДИОПОМЕХАМИ

Следует признать, что общий план книги С. А. Лютова, а также отдельные ее разделы разработаны недостаточно четко, недостаточно убедительно и ясно. Книга неудовлетворительно отредактирована как самим автором, так и редактором.

Отсутствие своевременной критики на эту книгу, изданную впервые в 1945 г. и затем с некоторыми добавлениями дважды переиздававшуюся, отсутствие в печати других серьезных сводных работ по вопросам борьбы с индустриальными радиопомехами, а также огромный спрос на литературу по данной отрасли техники привели к недостаточно критическому отношению к своему труду его автора.

В рецензии на книгу С. А. Лютова коллектива работников Центральной лаборатории индустриальных радиопомех не отмечены, пожалуй, главные недостатки книги, не указаны пути для создания действительно полноценного пособия. Более того, создается впечатление, что рецензия пытается направить внимание читателей на параллельное общим курсам радиотехники рассмотрение общих радиотехнических вопросов. Ряд приведенных в рецензии примеров противоречий и теоретических ошибок не отличается большой значимостью. Последнее обстоятельство позволяет автору книги сравнительно просто либо опровергнуть положения рецензентов, либо согласиться с ними, так как большинство примеров не носит принципиального характера. Такая критика не попадает в цель и отдаляет от определения требований к действительно полноценному пособию по борьбе с радиопомехами.

Основное замечание, говоря о «композиции» книги и ее содержании, заключается в том, что и автор и рецензенты пытаются повторять основные положения электротехники и радиотехники. Этого делать не следует. В специализированном руководстве целесообразно ограничиться отправными физическими посылками, готовыми формулами, указывая читателю соответствующие первоисточники.

В главе первой автор приводит некоторые данные о характере индустриальных радиопомех, о необходимых соотношениях полезного сигнала и помех в месте приема, о напряженности помех, полезного сигнала и о нормах допускаемых индустриальных радиопомех. Однако, поместив эти данные, автор не делает достаточных выводов, не объясняет, из чего исходят нормы, какая доля в борьбе с радиопомехами должна падать на мероприятия в месте приема и какая остается на подавление радиопомех у источника.

Автор ни слова не говорит о технико-экономических показателях различных мероприятий по борьбе с радиопомехами. Впрочем, этим пороком страдают и рекомендации Центральной лаборатории индустриальных радиопомех. Между тем борьба с радиопомехами затрагивает все стороны народного хозяйства и быта, связана с вложениями значительных материальных и денежных средств, недопущение и пропуск в инженерном пособии вопросов, относящихся к технико-экономическим показателям, недопустимо.

Одна из важнейших глав книги «Экранирование» (глава седьмая) дополнена автором в третьем издании рядом полезных сведений, однако ни автор книги, ни ее редактор не отработали материал этой главы в единое целое, а механически соединили отдельные куски текста. Вопросы экранирования требуют особенного внимания, учитывая, что стоимость экранирования и затраты цветного металла при широком проведении в СССР работ по подавлению радиопомех весьма значительны. Нельзя было в инженерном пособии упускать вопросы, связанные с нахождением экономически целесообразных решений в расчетах и конструкциях.

Рассматривая в книге вопрос о глубине проникновения высокочастотных токов для различных металлов, автор приводит на стр. 174 таблицу, в которой указано уменьшение амплитуды поля в $e = 2,718$ раза. Это общепринятое в радиотехнике положение, кстати сказать, обоснованное и технико-экономическими соображениями. Но на стр. 193 после краткой фразы: «В технике борьбы с индустриальными помехами при выборе толщины экрана пользуются глубиной проникновения, обеспечивающей спадение поля в 100 раз» автор приводит соответствующие графики, так и не объяснив, почему ослабление поля принято в сто раз. какие «особенности» техники борьбы с индустриальными помехами заставляют затрачивать большое количество цветного металла; эти вопросы предстаивает разбирать самому читателю.

В седьмой главе, как и вообще в книге, не даны указания по экранированию мощных высокочастотных генераторов, по расчету отвода тепла из полости экрана, по расчету потерь в экранах и по многим другим вопросам подавления радиопомех от высокочастотных генераторов, применяемых в промышленности, в научно-исследовательских организациях и в медицинских учреждениях.

В главе об экранировании читателю не поясняется, что подразумевает автор под выражением «многослойные комбинированные экраны»: подразумевает ли он сплошные комбинированные металлические экраны или экраны, разделенные воздушной или другой диэлектрической средой.

В книге явно недостаточно освещен вопрос о заземлениях, вообще, и, в частности об особенностях «заземлений» при высокой частоте и о мерах предосторожности, которые должен принимать персонал, соприкасающийся с высокочастотными установками.

Глава девятая «Измерение радиопомех» изложена недостаточно четко. Страницы, посвященные сравнительным старым методам измерений, отнюдь не бесполезны и рецензенты неосновательно упрекают автора по этому поводу. В разделе «Основные факторы, влияющие на точность измерителей радиопомех» автор зря не учитывает погрешностей, вносимых делителями, промежуточными элементами калибруемого приемника, калибрующими и другими элементами. В разделе об антенных устройствах измерителей радиопомех ничего не сказано о поляризации, о форме диаграмм направленности измерительных антенн, о пересчетных коэффициентах и т. д. Эти недостатки не восполняются и при описании приборов ИП-12М и ИП-14.

Недостаточен и притом явно устарел материал, помещенный в книге по вопросу подавления радиопомех от электротранспорта.

При всех отмеченных в рецензии и здесь недостатках книги нельзя не признать, что С. А. Лютов проделал большой и полезный труд; имеющиеся в последнем существенные дефекты необходимо в дальнейшей работе автора над книгой исправить.

Итак, задача создания инженерного пособия по борьбе с радиопомехами пока остается не решенной. Повидимому, она является сложной и трудной, требующей серьезной коллективной работы и товарищеской критической помощи.

Весьма полезно продолжить обсуждение литературы, включая ведомственные рекомендации, по вопросам борьбы с радиопомехами. Это можно было бы сделать в научно-техническом обществе энергетиков (ВНИТОЭ) и в обществе им. Попова.

Инж. А. П. ЩЕТИНИН
Государственная радиоинспекция



Указатель материалов, помещенных в журнале „Электричество“ в 1953 г.

I. Тематический указатель

Авторы и название материалов	№ журн. номера	Стр.	Авторы и название материалов	№ журн. номера	Стр.
От Центрального Комитета КПСС, Совета Министров СССР и Президиума Верховного Совета СССР. Ко всем членам партии, ко всем трудащимся Советского Союза			Архипов Н. К.— Расчет низковольтных сетей по отклонениям напряжения	4	17
1. ПЕРЕДОВЫЕ РЕДАКЦИОННЫЕ СТАТЬИ	3	1	Атабеков Г. И.— Вопросы релейной защиты линий электропередачи с продольной емкостной компенсацией	8	3
Занять первое место в мировой науке!	1	3	Белоусов М. М.— За увеличение расчетных пролетов линий электропередачи	9	9
За дальнейшее улучшение подготовки электротехнических кадров	2	3	Белоусов М. М.— Расчет сталеалюминиевых проводов по их действительным характеристикам	4	7
За дальнейший мощный подъем сельской электрификации	4	3	Веников В. А., Жуков Л. А. и Анисимова Н. Д.— Холостые режимы дальних электропередач	7	3
Неотложные задачи электрификации сельскохозяйственного производства	11	3	Ганелин А. М.— О расчете комплексного электрического сопротивления многопроволочных стальных проводов	11	59
2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА			Гельман Н. Л.— Два случая включения в работу увлажненных генераторов	11	70
Акользина Л. А.— Поле многослойного цилиндрического соленоида	7	60	Гершенгорн А. И., Шеренцис А. Н. и Мельников Н. А.— Транспозиция длинных линий электропередачи	1	16
Богатырев О. М.— Элементарная методика расчета линейных электрических цепей	4	66	Гогичаишвили П. Ф.— О поэтапном построении городских распределительных электросетей	8	11
Булгаков А. А.— К расчету переходных процессов с управляемыми выпрямителями	4	29	Двоскин Л. И.— Новая схема и конструкция распределительства электростанции	11	16
Воронов Р. А.— Расчет токов и напряжений в цепях с безинерционными нелинейными элементами	8	44	Джуварлы Ч. М.— К теории перенапряжений от заземляющих дуг в сети с изолированной нейтралью	6	18
Гинзбург С. А.— Синтез некоторых нелинейных цепей	2	48	Дмитриев В. М.— Определение экономической плотности тока в кабельной сети	10	24
Зелях Э. В.— К теории симметричной многофазной системы	4	61	Дроздов А. Д. и Михайлов В. В.— Применение в дифференциальной защите насыщающихся трансформаторов с подмагничиванием	11	40
Зотов В. П.— Энергетическая диаграмма магнитносвязанных контуров	11	61	Зархин М. М.— Об учете потерь электроэнергии в городских сетях	10	9
Казарновский Д. М.— К аналитическому расчету цепей с нелинейными конденсаторами	10	68	Иохвидов Э. С. и Сербновский Г. В.— О глубоком вводе высокого напряжения в города	9	3
Кузнецов П. И.— Расчет переходных процессов в длинных линиях при помощи цилиндрических функций от двух независимых переменных	5	35	Кодкинд И. И.— Включение генераторов сельских электростанций на параллельную работу способом самосинхронизации	9	15
Куренев С. И.— Расчет цепей при периодических разрывных или импульсных напряжениях	12	59	Крачковский Н. Н.— О схемах электрических соединений гидроэлектрических станций	11	6
Ионикин П. А.— Применение эквивалентных схем активного четырехполюсника и шестиполюсника для расчета нелинейных цепей	8	39	Кулемшов В. Н. и Соколов В. В.— Комплексная проводимость линий электросвязи и электропередачи	4	14
Лившиц А. Р. и Заславский А. Н.— Диапазонная фазосдвигающая схема	10	56	Лившиц Д. С.— Защита цеховых сетей автоматами и предохранителями	11	32
Лурье А. Г.— Потенциальные коэффициенты круглых дисков	3	61	Маркович И. М. и Соловьев С. А.— Экспериментальное исследование режима дальней электропередачи вблизи предела статической устойчивости	6	3
Негненицкий И. Б., Панина И. К. и Мищенко В. П.— Кривые одновременного намагничивания постоянным и переменным полями	3	63	Марченко Е. А.— Перенапряжения в установках продольной компенсации	12	10
Пухов Г. Е.— Применение методов исследования электрических цепей к решению задач изгиба плоских стержневых систем	9	50	Миронов Е. П.— О «пляске» проводов на линиях электропередачи	11	25
Пухов Г. Е.— Теория мощности системы периодических многофазных токов	2	56	Мусатов Т. П. и Коваленко В. П.— Включение мощных синхронных компенсаторов без сушки	8	59
Рабинович А. Д.— О быстрых переходных процессах в цепях постоянного и переменного тока	6	47	Огороднов С. И.— Некоторые выводы из опыта эксплуатации магистральной сети низкого напряжения	11	67
Ростовцев Н. А.— К расчету длиной линии постоянного тока в случае зависимости ее параметров от знака потенциала	5	62	Плюгачев В. К.— Сопротивление стальных проводов при токах короткого замыкания	6	36
Смирнов В. И.— Расчет сопротивления между электродами в некоторых потенциальных полях	9	55	Погарский В. И.— О рациональном уровне испытательного напряжения высоковольтных кабельных линий	10	74
Табачинский В. Ф.— Графоаналитический метод определения тока при включении цепи на несинусоидальное напряжение	11	64	Поспелов Г. Е.— О повышении динамической устойчивости дальних электропередач	6	14
Цейров Е. М.— О коэффициенте рекомбинации электронов	4	42	Ракушев Н. Ф.— Электрические свойства линий электропередачи с расщеплением фаз	2	7
3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ И СЕТИ			Розанов Г. М.— Неравные пролеты линии электропередачи при выпускающих зажимах	9	11
Азарьев Д. И., Веников В. А. и Соколов Н. Н.— Схемы дальних электропередач большой пропускной способности	12	3	Розовский Ю. А.— Об учете волновых процессов при анализе статической устойчивости дальних электропередач	3	17

Продолжение

Авторы и название материалов		№ жур-нала	Стр.	Авторы и название материалов		№ жур-нала	Стр.
№	Стр.			№	Стр.		
Розовский Ю. А.— О самораскачивании синхронных машин при их работе на компенсированную линию электропередачи	10	3	Башарин А. В.— Метод расчета результирующего полезного потока в машинах постоянного тока при нагрузках и перегрузках	9	24		
Секторов В. Р.— Использование энергии ветра для электрификации	3	11	Вольдек А. И.— Влияние неравномерности воздушного зазора на дифференциальное рассеяние асинхронной машины	8	32		
Сехниашвили Г. М.— Опыт эксплуатации передвижных тяговых подстанций	1	57	Вольдек А. И.— Дифференциальное рассеяние обмотки статора явнополюсной синхронной машины	7	46		
Синьков В. М. и Перепелов Б. В.— Анализ точности определения потерь в разветвленной сети по методу эквивалентного сопротивления	7	23	Глазенап М. С.— Несимметрическая нагрузка асинхронного самовозбуждающегося генератора	3	37		
Солдаткина Л. А.— К вопросу о схемах городской электросети низкого напряжения	12	14	Гончаров И. С.— Расчет продольной намагничивающей силы поперечной реакции якоря не-компенсированных машин постоянного тока	7	41		
Чернин А. Б.— Вычисление токов короткого замыкания в электросетях с продольным регулированием напряжения под нагрузкой	2	13	Грейсук М. В.— Выбор способа пуска асинхронных с короткозамкнутым ротором и синхронных электродвигателей	9	19		
Шкодин А. И.— Некоторые сведения об условиях работы линий электропередачи и связи в гололедных районах	10	14	Енько В. В.— Аналитическое выражение регулировочной характеристики синхронной неявнополюсной машины	12	31		
Шедрин Н. Н.— Упрощение расчетов коротких замыканий продольно-компенсированных линий электропередачи	1	11	Ермолин Н. П.— Пуск и реверс электродвигателей постоянного тока последовательного возбуждения	12	26		
<i>По страницам технических журналов</i>							
Индуктивное влияние линий электропередачи на железнодорожные линии связи	4	92	Жиц М. З.— Исследование процесса самовозбуждения тяговых двигателей последовательного возбуждения при реостатном торможении	4	55		
Исследование короны на опытной установке 500 кв	6	74	Золотарев О. И.— Электромашинные регуляторы с продольным полем	3	27		
Исследования радиопомех от линий передачи 500 кв	6	78	Иносов В. Л. и Цукерник Л. В.— Методика расчета токов и напряжений обмоток возбуждения возбудителя при форсировке	12	20		
Коммутация и защита самолетной электрической системы постоянного тока	6	81	Кантор Р. М.— О процессах установления при асинхронном самовозбуждении синхронных генераторов	7	17		
Комплектные передвижные трансформаторные подстанции	10	87	Кожевников К. И.— Способ проверки пригодности двигателя постоянного тока при скорости вращения выше номинальной	11	52		
Линии межсистемной связи в условиях объединения крупных электроэнергетических систем	7	81	Колосов С. П.— Токи короткого замыкания мало-мощных трансформаторов	3	58		
Местная электроэнергетическая система с дублированием мощности	2	90	Крайцберг М. И.— Исследование двухфазной асинхронной машины при несимметричном питании	3	31		
Опытное исследование процессов при АПВ в сети 30 кв	11	88	Куницкий Н. П.— Получение оптимальной кривой тока двигателя при ослаблении потока	1	26		
Передвижная электростанция ГАЗ-МК	11	88	Левин М. С. и Куц П. В.— О сопротивлении нулевой последовательности асинхронных двигателей	2	37		
Передвижная электрическая станция мощностью 24 квт	6	73	Мирер А. Г.— Работа трехфазного асинхронного двигателя в специальной схеме однофазного включения	6	44		
Пловучая электростанция	12	79	Неболюбов Ю. Е.— Моделирование процесса коммутации в однофазных коллекторных двигателях переменного тока	3	39		
Применение опор из центрифугированного железобетона для электропередач	12	79	Нейман З. Б.— Подпятники вертикальных электрических машин	7	52		
Проект английской высоковольтной сети 275 кв	10	87	Столов Л. И.— О форме механической характеристики двигателей параллельного возбуждения малой мощности	10	43		
Радиопомехи, вызываемые высоковольтными линиями передачи	9	84	Сыромятников И. А.— Нагрев массивных роторов при асинхронном пуске	1	22		
Развитие системы 380 кв в Швеции	8	82	Сыромятников И. А.— Требования к синхронным двигателям и их схемам управления и защиты	5	3		
Разрядные напряжения больших промежутков при промышленной частоте и при импульсах	4	91	Урусов И. Д.— Анализ тока статора при гармонически пульсирующем моменте синхронной машины	2	29		
14-я сессия Международной конференции по электрическим сетям высокого напряжения в Париже	5	84	Фетисов В. В.— Переходное падение напряжения и потери под щетками в машине постоянного тока при расстроенной коммутации	8	23		
Экспериментальные данные исследования устойчивости узла нагрузки энергосистемы	2	90	Фетисов В. В.— Потенциальная кривая на коллекторе и ее влияние на образование кругового огня	2	25		
Электропередачи постоянного тока высокого напряжения	2	91	Фрид Е. С.— Методика импульсных испытаний трансформаторов	35	22		
Электростанции, работающие на вулканическом ларе	5	92	Штерн Г. М.— Круговая диаграмма асинхронного двигателя с двойными кольцами на роторе	6	51		
4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ТРАНСФОРМАТОРЫ							
Алябьев М. И.— Обобщенные векторы, реактивности и потокосцепления синхронной машины	1	31					
Алябьев М. И.— Операторные уравнения для напряжений, токов и потокосцеплений синхронной машины при ненулевых начальных условиях	3	44					
Бабат Г. И.— Получение высоких напряжений при помощи резонансных трансформаторов	12	35					
Барский С. З.— Некоторые вопросы теории синхронизированного асинхронного двигателя	11	45					

Продолжение

Авторы и название материалов	№ журн. нала	Стр.	Авторы и название материалов	№ журн. нала	Стр.
<i>По страницам технических журналов</i>					
К расчету механических усилий в трансформаторах	1	81	Коршунов Ю. М.—Графический метод расчета переходных процессов в трансформаторах тока	10	36
Многократная наплавка машинных деталей	9	81	Кочан В. А.—Точность измерений сопротивлений двойным мостом	3	65
Современные тенденции в конструировании трансформаторов для очень высоких напряжений	12	80	Кукеков Г. А. и Сорокин П. Г.—О гашении дуги в устройствах для отключения мощных цепей постоянного тока сверхвысокого напряжения	10	20
Трансформаторы 380 кв	6	83	Кулаковский В. Б. и Эзрина И. В.—Испытания увлажненной изоляции статора крупного генератора	6	60
Тяговый двигатель для троллейбусов	3	90	Лебедев Г. А.—Зависимость мокроразрядных напряжений изоляторов от давления воздуха	3	7
Уточненный расчет напряжения короткого замыкания трансформаторов	8	87	Малов В. С.—Вопросы развития телеметрических систем дальнего действия	1	7
5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ, ПРИБОРЫ И ИЗМЕРЕНИЯ			Москалев А. Г.—Запись частоты для определения частотных динамических характеристик энергосистем	8	14
Акодис М. М.—Влияние емкостей ионных преобразователей на погасание вентиляй	9	43	Негневицкий И. Б. и Самурина Л. Л.—Экспериментальное исследование переходных процессов в бесконтактных магнитных реле	9	64
Акодис М. М.—Принципы построения искусственных схем испытания дугогасящих устройств	5	18	Нетушил А. В. и Лисенков А. А.—Измерение температур диэлектриков и полупроводников в полях высокой частоты	2	42
Арутюнов В. О. и Горюнов П. Н.—К обобщенной теории индукционных электроизмерительных приборов	8	54	Нечаев Г. К. и Пиневич М. М.—Система температурной сигнализации на термосопротивлениях	9	48
Баранчук Е. И.—Электронные устройства для стабилизации следящих приводов переменного тока	6	39	Павлов Г. М.—Исследование регулирования частоты и активной мощности на электродинамической модели гидроагрегата	6	9
Векслер Г. С.—К осциллографическому методу измерения магнитных свойств ферромагнитика	4	72	Пеккер И. И.—О влиянии вихревых токов на времена трогания и отпуска броневого электромагнита с массивным сердечником	12	50
Гончарский Л. А.—Об одном методе усиления при помощи тиатрона	10	59	Привальский Б. Я.—Выбор сопротивления шунта компенсационной обмотки электромашинного усилителя	10	44
Грановский В. Л. и Лукацкая И. А.—Природа обратного тока в ионном вентиле при высоком обратном напряжении	8	49	Розенблат М. А.—Графическое определение запаздывания магнитных усилителей	10	38
Грейнер Л. К. и Никифоровский Н. Н.—Управление высоковольтными выключателями на оперативном переменном токе	5	50	Розенкранц А. С.—О моделировании электромагнитного аппарата переменного тока электрической цепью	5	67
Донской А. В. и Ивенчик Г. В.—Выпрямительные ваттметры для высокочастотных электротермических установок	10	46	Сирота И. М.—Подмагничивание трансформаторов тока нулевой последовательности	5	23
Дроздов А. Д.—Насыщающиеся трансформаторы тока с короткозамкнутыми витками для релейной защиты	10	32	Ситников О. П.—Работа дугогасящих устройств с газовым автодутьем	4	38
Дроздов А. Д. и Михайлов В. В.—Применение в дифференциальной защите насыщающихся трансформаторов с подмагничиванием	11	40	Слежановский О. В.—Анализ системы управления блюмингом при помощи статических характеристик	3	51
Закс Л. М.—Общие свойства магнитоэлектрических указателей в схемах дистанционного измерения	10	51	Соколов Ф. Ф.—Из опыта эксплуатации селеновых выпрямителей	3	69
Закс Л. М.—Рациональный выбор параметров последовательно-параллельной схемы температурной компенсации милливольтметров	2	62	Танатар А. И.—Схема включения электромагнитного реле времени, обеспечивающая зависимую от тока выдержку времени	5	75
Зубрицкий Б. С.—Опыт эксплуатации новых быстродействующих выключателей на тяговых подстанциях	2	68	Харченко Р. Р.—Импульсная реакция приборов магнитоэлектрической системы	5	30
Иванов Л. И.—Зависимость коэффициента импульса вентильного разрядника от емкости виолитовых сопротивлений	6	27	Четверикова М. М.—Автоколебания в высоковольтном вентиле	4	35
Каплан В. В. и Нашатырь В. М.—О применении связанных колебательных контуров для испытания небыстродействующих высоковольтных аппаратов	5	13	Шевченко Г. И.—Стабилизация выходного напряжения ионного преобразователя частоты	5	57
Каплянский А. Е.—Методы конструирования сегнетоэлектрической аппаратуры	1	44	<i>По страницам технических журналов</i>		
Катаргин Ю. Н.—Чувствительность релейной защиты с трансформаторами тока, имеющими сердечники из немагнитных материалов	6	32	Амплитудный катодный анализатор	9	81
Катков Ф. А.—Бесконтактное реле частоты	10	40	Диэлектрические усилители	5	90
Карапанеев К. Б. и Швецкий Б. И.—К вопросу об уравновешивании мостов переменного тока	4	23	О некоторых применениях электростатических ускорителей заряженных частиц	6	82
Карапанеев К. Б. и Шрамков А. Я.—Выпрямительные ваттметры	12	44	Прибор для защиты от окисления масла во вводах	3	88
Кацнельсон С. М.—Катодный осциллограф с периодическим импульсным питанием	12	48	Пусковые муфты с ферромагнитным порошком	6	84
Кацнельсон О. Г. и Эдельштейн А. С.—Прецизационный соленоидный стабилизатор электрического тока	1	48	Трансформатор тока, подмагнченный током повышенной частоты	2	92
			Упрощенный графический анализ работы дросселя насыщения при установившемся режиме	8	88
			Электронные микрометры	7	84

Продолжение

Авторы и название материалов	№ журн. нала	Стр.	Авторы и название материалов	№ журн. нала	Стр.
6. ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ			7. СВЕТОТЕХНИКА		
Барон И. Ю.—Статические диаграммы буждающих токов	9	70	Капник М. Ш.—Схема включения люминесцентных ламп при измерении их характеристик	9	61
Борисов К. Н.—Применение дросселей насыщения в схемах регулирования электрических печей	4	44	По страницам технических журналов		
Ефромович Ю. Е.—Расчет электрического режима дуговых сталеплавильных печей с учетом выпрямляющего действия дуги	1	42	Влияние влажности на зажигание люминесцентных ламп	9	83
Живов Л. Г.—Расчет регулировочных сопротивлений системы генератор-двигатель привода шахтной подъемной машины	9	26	Задачи светотехники в реконструкции наружного освещения Москвы	5	83
Ильин О. П.—О выборе передаточного числа редуктора электропривода при заданном графике движения механизма	10	28	Новое в технике освещения очистных забоев	8	80
Каганов И. Л.—Применение электроники в промышленности	7	27	Освещение фасадов высотных зданий	5	83
Каганов И. Л.—Применение электроники в промышленности (окончание)	8	16	8. ЭЛЕКТРОМАТЕРИАЛЫ И КАБЕЛИ		
Каспржак Г. М. и Алекин Л. Е.—Вопросы теории саморегулирования при сварке плавящимся электродом	5	41	Белоусов М. М.—За увеличение расчетных пролетов линий электропередачи	9	9
Каялов Г. М.—Методика опытных исследований в промышленной электроэнергетике	5	7	Белоусов М. М.—Расчет стаеалюминиевых проводов по их действительным характеристикам	4	7
Петров Б. П.—Автоматическое управление электрическим подвижным составом с ионными преобразователями	9	38	Ганелин А. М.—О расчете комплексного электрического сопротивления многопроволочно-стальных проводов	11	59
Свенчанский А. Д. и Шур Д. А.—Расчет нагревателей электрических открытых плит и нагревательных приборов	11	56	Голубцова В. А. и Андрианов К. А.—Нефтяные масла и полимерные углеводороды как диэлектрики	1	51
Спиридонов В. А.—Приближенные зависимости электропотребления электротранспорта	4	75	Завадовская Е. К.—Влияние пористости на электрическую прочность твердых диэлектриков	5	28
Староскольский Н. А. и Бахмутский Ф. И.—О зависимости искровоспламеняющего тока от частоты	7	59	Иванов И. И.—О методике определения водопоглощаемости слоистых пластмасс	2	45
Трахтман Л. М.—Метод определения колебаний напряжения в тяговых сетях	9	34	Ренне В. Т., Файницкий В. М. и Варшавский Д. С.—Воскообразование в изоляции бумажно-масляных конденсаторов	12	55
Трещев И. И.—К вопросу об общей теории электрического вала	1	38	Рабкин Л. И. и Юзвинская П. И.—Некоторые свойства пермаллоя тонкого проката	10	63
Чиликин М. Г. и Корытин А. М.—Механические характеристики электротранспортных приводов	4	47	По страницам технических журналов		
Чиликин М. Г. и Корытин А. М.—Некоторые вопросы динамики электротранспортных приводов	12	40	Алюминиевые провода в самолетостроении	1	79
По страницам технических журналов	3	88	Алюминиевый сплав для изготовления сверхмощных генераторов	6	74
Автомат для закатки корпусов автомобильных и тракторных фар	4	90	Вибрационная усталость стальных многопроволочных тросов	5	90
Аккумуляторный автопогрузчик грузоподъемностью 0,75 т	1	79	Подземные кабелепроводы	1	80
Ближайшие задачи развития сварочной техники на великих стройках	7	82	Положительный опыт применения стаеалюминиевого контактного провода	4	93
Высокочастотный диэлектрический нагрев	3	89	Ультразвуковые испытания керамических материалов	4	91
Дизель-троллейбус на 1 100 в	1	79	9. СТАНДАРТЫ И НОРМЫ		
Задача подземных сооружений от действия буждающих токов	8	80	К пересмотру правил защиты подземных металлических сооружений от коррозии—Цекун Н. А.	8	70
Некоторые новые применения диэлектрического нагрева	4	90	Терминология теоретической электротехники—Лавров В. М.	1	65
Новое электрооборудование для автомобиля «Москвич»	10	86	10. ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ		
Новые электрифицированные машины	11	88	Аксенов В. Ф.—Из воспоминаний инженера Новороссийской электростанции	12	68
Применение электроосмоса в строительстве	6	80	Баумгарт К. К.—Выдающийся профессор физики О. Д. Хвольсон	1	62
Радиопомехи от электрифицированных железных дорог	6	73	Брон О. Б.—М. О. Доливо-Добровольский—изобретатель искрогасительной решетки	5	77
Синхронный электропривод нефтепромысловых компрессоров	9	81	Голубцова В. А.—Электрическая изоляция в работах П. Л. Шиллинга и Б. С. Якоби	4	80
Шагающая землесосная установка	8	84	Гусев С. А.—Первая русская установка трехфазного тока	12	65
Электрификация железных дорог Северной Франции на однофазном токе 50 гц	3	88	Дорфман Я. Г.—Выдающийся русский физик Г. В. Рихман и его роль в истории науки об электричестве	8	61
Электрифицированные механизмы	6	74	Д. Р.—Выдающийся русский электротехник-изобретатель А. Н. Лодыгин	3	73
Электрифицированный пильно-кольпный агрегат для заготовки газогенераторных чурок	9	85	Д. Р. Уильям Гильберт. К 350-летию со дня смерти.	12	63
Электровоз с игнитронными выпрямителями пенисильванской железной дороги (США)	4	90			
Электроискровой способ восстановления деталей машин и упрочнения инструмента					

Продолжение

Авторы и название материалов	№ журн. ната	Стр.	Авторы и название материалов	№ журн. ната	Стр.		
Жестяников В. М.— К вопросу об истории изучения электрических свойств углерода	1	61	К статье Б. Г. Лорткипанидзе «О правилах защиты подземных металлических сооружений от коррозии буждающими токами» — Вислоух Л. А.	5	80		
Кьяндинский Г. А. и Попова-Кьяндинская Е. А.— А. А. Петровский	7	64	К статье А. П. Щеглова и В. К. Косарева «Опыт внедрения полузамкнутых и замкнутых схем в городскую электросеть» — Козлов В. А.	9	76		
Манюлов В. Е.— Советская научная школа электропривода	2	74	К определению ампера — четвертой основной единицы в абсолютной практической системе единиц — Маликов М. Ф., Горбачевич С. В., Юматов А. А., Бирзвалик Ю. А., Поливанов К. М.	4	87		
Немировский Е. Л.— Гальванический элемент П. Р. Багратиона	9	73	К проекту правил устройства электротехнических установок. Проводки шинопроводами — Юматов А. А.	4	89		
Салгус Г. К.— К изобретению электромашинной автоматики	3	74	Татко Б. С.	5	81		
Сидлик Л. З.— Об изобретении расщепленных проводов	8	67	Об учебнике по теоретической электротехнике для высшей школы — Романовский В. Б., Воронов Р. А., Пухов Г. Е., Борковский Б. А., Сосунова В. Н.	6	68		
Федоров А. Д.— К биографии А. С. Попова	7	67	Берендеев А. В., Янко-Триницкий А. А.	7	69		
Фрумкин А. Н. и Обручева А. Д.— Работы Б. С. Якоби в области химических источников тока	2	71	Каплянский А. Е., Полотовский Л. С.	10	78		
Шаров В. С.— Трехфазный одноякорный преобразователь Доливо-Добровольского	11	75	Метелкин А. Ф., Карпова К. А., Лурье Л. С., Рахимов Г. Р., Кязим-Заде З. И.	12	70		
Шнейберг Я. А.— Об установлении академиком В. В. Петровым закономерности в электрической цепи	11	71	О мерах повышения коэффициента мощности электроустановок промышленных предприятий — Сыромятников И. А., Грудинский П. Г., Лихачев М. С., Литвак Л. В., Гейлер Л. Б.	2	80		
Шнейберг Я. А.— О батарее В. В. Петрова и его опытах с электрической дугой и разрядом в вакууме	1	60	Правила устройства электротехнических установок — Горенштейн М. Д., Караман В. А., Глейзер М. Д.	8	73		
<i>По страницам технических журналов</i>							
Развитие теории электромагнитного поля в трудах русских физиков до опытов Герца	12	78	Терминология теоретической электротехники — Грушевский Б. В., Воронов Р. А.	9	78		
11. ДИСКУССИИ							
К вопросу о четырехпроводных и шестипроводных линиях электропередачи — Белоусов М. М., Баскаров Г. Н., Сирота И. М. и Розенберг Б. И.	3	75	Жеребцов И. П., Чернявский Ф. И., Кязим-Заде З. И., Сукачев А. П., Рязанов Г. А., Гуревич Л. Э., Генерозов М. В.	10	80		
Книга «Общая электротехника» под ред. С. А. Пресса — Чернявский Ф. И., Балуев В. К. и Грушевский Б. В.	2	75	Артемьев А. И.	11	76		
Фугенфирров М. И.	3	81	Термины и определения в Правилах изготовления взрывозащищенных машин и электрических аппаратов — Лившиц С. М.	12	73		
Межлумов А. А.	4	86	12. ЗАМЕТКИ И ПИСЬМА				
Юматов А. А., Палян Х. Р., Розанов С. П.	11	81	Включение амперметра в рассечку шин высокого напряжения — Ермилов А. А.	6	71		
Книга по электроснабжению промышленных предприятий — Сурков С. К., Васильев П. А., Липкин Б. Ю., Найдис В. А., Кулаков А. А., Соколов М. М. и Грудинский П. Г.	2	77	В редакцию журнала «Электричество» — Глазунов А. А., Веников В. А.	3	94		
Тайц А. А.	3	82	Два термина по электротяге — Голованов В. А.	8	79		
Харчев М. К., Приклонский Е. Н., Ходоров С. Е., Константинов Б. А., Шепеленко В. А., Шулятьева Г. Н., Котовая Т. Л., Соколова К. И. и Булгаков К. В.	7	76	К вопросу по пересмотре научно-технической терминологии — Степанов А. Д.	12	74		
Лившиц Д. С., Найфельд М. Р., Тайц А. А.	10	82	К вопросу об учете поправочного члена в уравнении двойного моста — Шрамков А. Я.	6	72		
Лившиц С. М., Калялов Г. М., Гейлер Л. Б.	11	84	К письму кафедры электрических сетей и систем МЭИ им. Молотова — Каменский М. Д.	10	86		
К статье А. А. Глазунова, А. А. Глазунова и Г. М. Розанова «Экономически целесообразное отношение сечения алюминия и стали в сталялюминиевых проводах» — Крачковский Н. Н., Голубцов Р. А.	4	84	К расчету несимметричных трехфазных систем — Гикис А. Ф.	7	80		
Лопатин И. А., Вексельман О. Г.	6	61	О методике изложения некоторых вопросов в курсах электрических машин и электрического привода — Гейлер Л. Б.	2	89		
Бургсдорф В. В.	7	73	О регулирующем эффекте нагрузки — Горнштейн В. Г.	8	78		
К статье М. И. Гитмана «Вопросы электроснабжения сельского хозяйства в зонах крупных гидроэлектростанций» — Будзко И. А.	8	73	О термине «Реактивный двигатель» — Бергер А. Я., Отвагин Е. В.	5	79		
К статье Е. В. Калинина «О защите от перенапряжений межвитковой изоляции первичных обмоток трансформаторов» — Сыромятников И. А., Джаншиев И. А., Калинин Е. В.	6	66	По поводу рецензии на Справочник электромонитажника — Лучининов С.	12	75		
К статье Н. Н. Крачковского «Некоторые вопросы схем коммутации высоковольтных сетей» — Лебедев М. М.	3	82	По поводу статьи С. Г. Таманцева «Синхронный генератор с самовозбуждением от механического выпрямителя и автоматическим регулированием напряжения» — Каплянский А. Е.	12	76		
К статье С. М. Лившица «О расчетах и исследовании электрических промышленных нагрузок» — Калялов Г. М., Шницер Л. М.	3	84	Трамвай в Днепропетровске пущен в 1897 г. — Гавриленко Н. Е., Олейник В. В. и Ломазов Д. Б.	2	88		

Продолжение

Авторы и название материалов	№ жур-нала	Стр.	Авторы и название материалов	№ жур-нала	Стр.
13. ЗАОЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ЧИТАТЕЛЕЙ ЖУРНАЛА «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»	1	84	Книга М. В. Константинова «Технология производства кабельных изделий с резиновой изоляцией» — Горшков П. Н.	3	94
14. ХРОНИКА	8	89	Книга О. А. Лежневой и Б. Н. Ржонсицкого «Эмилий Христинович Ленц» — Цверава Г. К.	6	93
<i>Информация</i>	11	87	Книга С. А. Лютова «Индустримальные помехи радиоприему и борьба с ними» — Ильгекит Ф. Э., Шапиро Д. Н., Фоменко Л. А., Карпинский М. А., Ферсман А. А., Певницкий В. П.	12	85
В Московском энергетическом институте им. Молотова	7	86	От автора книги — Лютов С. А.	12	87
Всесоюзное научно-техническое совещание по пьезоэлектричеству	6	85	К вопросу о создании инженерного пособия по борьбе с радиопомехами — Щетинин А. П.	12	89
В секции электротермии МОНИТОЭ и Дома инженеров и техников им. Дзержинского	6	86	Книга Я. В. Мильмана и И. А. Петрова «Автоматика электропривода текстильных машин» — Быстров А. М.	11	93
Двадцать лет ВНИТОЭ	3	91	Книга В. А. Привезенцева «Обмоточные провода с эмалиевой и волокнистой изоляцией» — Сидоров К. Б.	2	96
Диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук (1946—1952 гг.)	7	87	Книга М. Г. Чиликина «Общий курс электропривода» — Хализев Г. П.	2	94
Золотая медаль имени С. И. Вавилова и премия имени Л. И. Мандельштама	2	93	Книга М. Г. Чиликина «Общий курс электропривода», 2-е издание — Петров И. И.	11	92
Конференция по осветительным установкам	8	92	Книги Д. С. Чукаева «Электроснабжение городов» и Н. В. Волоцкого «Электрические установки жилых домов» — Сербиновский Г. В. и Иохвидов Э. С.	8	94
Конференция по тяговому электрооборудованию	3	93	Книги по электрооборудованию троллейбусов: И. С. Ефремова. Троллейбусы. Часть II. Электрическое оборудование; С. А. Реброва. Электрооборудование троллейбусов типа МТБ; С. А. Реброва. Устройство и эксплуатация троллейбусов; В. Л. Марковникова и Д. И. Перкиса. Учебное пособие для водителей троллейбуса — Галонен Ю. М.	1	92
На соревновании, посвященном изобретению телеграфа	1	91	Научная литература по дизельгенераторам — Нетушил А. В.	10	96
Научная сессия в Азербайджанском индустриальном институте	10	91	Справочник электрика предприятий черной металлургии — Гейлер Л. Б.	7	95
Научно-техническая сессия по электроприводу подъемно-транспортных механизмов	9	88	Справочник электромонтажника — Татко Б. С.	6	94
Научно-техническое совещание по сельской электрификации в Тбилиси	12	81	Электротехнический справочник под общей редакцией профессоров Московского энергетического института им. Молотова — А. Т. Голована, П. Г. Грудинского, Г. Н. Петрова, А. М. Федосеева и М. Г. Чиликина (главный редактор) — Сиунов Н. С., Акодис М. М., Трофименко Д. Е., Степанов В. Г., Поляков В. Е., Беляев М. В., Ситников О. П., Криченова П. А., Чистосердов М. Г., Перепелов Б. В., Дробинин Я. И.	9	93
На Физическом факультете Московского государственного университета им. Ломоносова	1	92	16. РАЗНОЕ		
Открытие Академии наук Корейской Народно-Демократической Республики	2	93	Тареев Б. М. и Магидсон А. О. — Заочное усовершенствование знаний инженеров-энергетиков	6	57
Рассыпухинская межколхозная гэс	2	93	Тематический план журнала «Электричество» на 1953—1955 гг.	11	95
Совещание по использованию ветра	5	94	<i>Номограммы (на третьих полосах обложек):</i>		
Совещание по эксплуатации электротракторов	6	88	Для возведения числа в степень большие единицы Кривые одновременного намагничивания постоянным (H) и переменным током (H_{ncf}) частоты 400 гц кольцевого сердечника из молибденового пермаллоя толщиной 0,25 мм	2	
Совещание по электромобилям	4	95	Постоянная составляющая индукции кольцевого сердечника при одновременном намагничивании постоянным и переменным током частоты 400 гц	3	
Учреждение Академии наук в Чехословакии	2	93	Для расчета магнитного напряжения зубцов электрических машин	4	
Электрическая тяга на однофазном токе промышленной частоты	10	93	Для определения снижения тока к. з. от нагрева стальных проводов и температуры проводов спустя время t от начала к. з.	5	
<i>Юбилеи</i>			Для решения полного кубического уравнения	6	
Профессор Г. В. Буткевич	2	95		8	
Профессор И. В. Егиазаров	6	90			
Профессор А. М. Залесский	2	94			
Профессор Н. А. Калякин	4	94			
Профессор Е. В. Китаев	5	95			
Инженер В. К. Крапивин	4	95			
Профессор М. М. Михайлов	2	95			
Профессор И. И. Соловьев	10	93			
<i>Некрологи</i>					
А. А. Андронов	2	95			
В. П. Вологдин	7	94			
А. А. Гершун	6	91			
А. А. Горев	7	93			
Е. О. Патон	12	84			
В. И. Петров	12	84			
15. БИБЛИОГРАФИЯ					
Книга А. Е. Алексеева «Тяговые электродвигатели» — Пухов Е. М. и Глебов В. А.	5	96			
Книга Ю. И. Аносова «Электромагнитные муфты (конструкции и схемы управления)» — Гейлер Л. Б.	9	96			
Книга Н. Х. Голимбиевского и Л. И. Мачерет «Освивование кабелей» — Шарле Д. Л. и Лакерник Р. М.	6	96			
Книга И. Я. Гумина «Вторичные схемы электрических станций» — Синьков В. М. и Прессман С. М.	10	94			
Книга Е. В. Китаева и Н. Ф. Гревцева «Курс общей электротехники» — Атабеков Г. И., Александров Н. К., Сыромятников Д. В., Пантюшин В. С., Смирнов В. А., Пухляков Ю. Х., Зайдель К. Э., Коген В. В., Шархин Г. И.	9	89			

2. Алфавитный указатель авторов

А

Азарьев Д. И. 12, 3
Акодис М. М. 5, 18; 9, 43; 9, 93
Акользина Л. А. 7, 60
Аксенов В. Ф. 12, 68
Алекин Л. Е. 5, 41
Александров Н. К. 9, 89
Алябьев М. И. 1, 31; 3, 44
Андраник К. А. 1, 51
Анисимова Н. Д. 7, 3
Аносов Ю. И. 6, 84
Артемьев А. Е. 12, 73
Арутюнов В. О. 8, 54
Архипов Н. К. 4, 17
Атабеков Г. И. 8, 3; 9, 89;

Б

Бабат Г. И. 11, 12, 35
Балуев В. К. 2, 75
Баранчик Е. И. 6, 39
Барон И. Ю. 9, 70
Барский С. З. 11, 45
Баскаев Б. Н. 3, 76
Баумгарт К. К. 1, 62
Бахмутский Ф. И. 7, 59
Башарин А. В. 9, 24
Белоусов М. М. 3, 75; 4, 7; 9, 9
Беляев М. В. 9, 93
Берендеев А. В. 7, 69
Богатырев О. М. 4, 66
Борисов К. Н. 4, 44
Борковский Б. А. 6, 69
Бризводж Ю. А. 4, 88
Брон О. Б. 5, 77
Будако И. А. 8, 73
Булгаков А. А. 4, 29; 7, 79
Бургдорф В. В. 7, 73
Быстров А. М. 11, 93

В

Варшавский Д. С. 12, 55
Васильев П. А. 2, 77
Вексельман О. Г. 6, 64
Векслер Г. С. 4, 72
Веников В. А. 7, 3; 12, 3
Вислоух А. С. 89; 4, 92; 5, 80;
90; 6, 78; 80; 8, 84; 9, 85
Вольдек А. И. 7, 46; 8, 32
Воронов Р. А. 6, 69; 8, 44; 9, 80
Галонен Ю. М. 1, 92; 3, 90
Ганелин А. М. 11, 59; 12, 81
Гейлер Л. Б. 2, 80; 7, 95; 9, 96;
11, 76
Гельман Н. Л. 11, 70
Генерозов М. В. 11, 76
Гершенгорн А. И. 1, 16, 6, 74;
8, 82; 12, 80
Гинзбург С. А. 2, 48
Глазенап М. С. 3, 37
Глебов В. А. 5, 96
Глейзер М. Д. 8, 75
Гогичашвили П. Ф. 8, 11
Голубцов Р. А. 4, 85
Голубцова В. А. 1, 51; 4, 80
Гончаров И. С. 7, 41
Гончарский Л. А. 6, 82; 7, 84;
9, 81; 10, 59
Горбачевич С. В. 4, 87
Горенштейн М. Д. 8, 73
Горшков П. Н. 3, 94
Горюнов П. М. 8, 65
Грановский В. Л. 8, 49
Грейнер Л. К. 5, 50
Грейхук М. В. 9, 19
Грудинский П. Г. 2, 77, 80
Грушевский В. В. 2, 75; 9, 78
Гуревич Л. Э. 11, 76
Гусев С. Я. 12, 65

Д

Двоскин Л. Н. 11, 16
Джаншин И. А. 6, 67
Джуварлы Ч. М. 6, 18
Дмитриев В. М. 10, 24
Донской А. В. 10, 46
Дорфман Я. Г. 8, 61
Дробинин Я. И. 9, 93
Дроздов А. Д. 10, 32; 11, 40

Е

Енъко В. В. 11, 12, 31
Ермолин Н. П. 12, 26
Ефромович Ю. Е. 1, 42

Ж

Жеребцов И. П. 10, 80
Жестяников В. М. 1, 61
Живов Л. Г. 9, 26
Жиц М. З. 4, 55
Жуков Л. А. 7, 3

З

Завадовская Е. К. 5, 28
Зайдель К. Э. 9, 89
Закс Л. М. 2, 62; 10, 51
Зархин М. М. 10, 9
Заславский А. Н. 10, 56
Зелях Э. В. 4, 61
Золотарев О. И. 3, 27
Зотов В. П. 11, 61
Зубрицкий Б. С. 2, 68
Зуль Н. М. 11, 88

И

Иванов И. И. 2, 45; 6, 27
Ивенский Г. В. 10, 46
Ильин Ф. Э. 12, 85
Ильин О. П. 10, 28
Иносов В. Л. 12, 20
Ионкин П. А. 8, 39
Иохвидов Э. С. 8, 94; 9, 3
Истратов В. Н. 2, 92; 6, 81;
8, 88

К

Каганов И. Л. 7, 27; 8, 16
Казарновский Д. М. 10, 68
Калинин Е. В. 6, 67; 9, 84
Кантор Р. М. 7, 17
Каплан В. В. 5, 13
Каплянский А. Е. 1, 44; 10, 78
Капник М. Ш. 9, 61
Караман В. А. 8, 74
Карандеев К. Б. 4, 23; 12, 44
Карпинский М. А. 12, 85
Карпова К. А. 12, 70
Каспржак Г. М. 5, 41
Катаргин Ю. Н. 6, 32
Катков Ф. А. 10, 40
Кацельсон О. Г. 1, 48
Кацельсон С. М. 12, 48
Каялов Г. М. 3, 84; 5, 7; 11, 76
Коваленко В. П. 8, 59
Коген В. В. 9, 89
Кодкинд И. И. 9, 15
Кожевников К. М. 11, 52
Козлов Б. А. 9, 76
Колосов С. П. 3, 58
Константинов Б. А. 7, 78
Коршиков Ю. М. 10, 36
Корытин А. М. 4, 47; 12, 40
Котовая Т. Л. 7, 78
Кочан В. А. 3, 65
Крайз А. Г. 1, 81; 4, 91; 5, 92;
6, 83; 8, 87
Крайцберг М. И. 3, 31
Крачковский Н. Н. 4, 84; 11, 6
Кривоуб Д. С. 1, 79, 80
Кричевона П. А. 9, 93
Кузнецов П. И. 5, 35
Кузьменко Л. В. 11, 88
Кукеков Г. А. 10, 20
Кулаков 2, 77
Кулаковский В. Б. 6, 60
Кулешов В. Н. 4, 14
Куницкий П. Н. 1, 26
Куренов С. И. 12, 59
Куц П. В. 2, 37
Кьяндинский Г. А. 7, 64
Кязим-Заде З. Н. 10, 81; 12, 70

Л

Лавров В. М. 1, 65
Лакерник Р. М. 6, 96
Лебедев Г. А. 3, 7
Лебедев М. М. 3, 82
Левин М. С. 2, 37
Ливин А. Р. 10, 56
Ливин Д. С. 10, 82; 11, 32
Ливин С. М. 8, 76; 11, 76
Липкин Б. Ю. 2, 77
Лисенко А. А. 2, 42
Литвак Л. В. 2, 80
Лихачев М. С. 2, 80
Лопатин И. А. 6, 61
Лукацкая И. А. 8, 49

Лурье А. Г. 3, 61
Лурье Л. С. 12, 70
Лучининов С. 12, 75
Лютов С. А. 12, 87

М

Магидсон А. О. 6, 57
Маликов М. Ф. 4, 87
Малов В. С. 1, 7
Манойлов В. Е. 2, 74
Маркович И. М. 6, 3
Марченко Е. А. 12, 10
Междумов А. А. 4, 86
Мельгумов Н. М. 2, 91
Мельников Н. А. 1, 16
Метелкин А. Ф. 12, 70
Мирер А. Г. 6, 44
Миронов Е. П. 11, 25
Михайлов В. В. 11, 40
Мищенко В. П. 3, 63
Москалев А. Г. 8, 14
Мусатов Т. П. 8, 59

Н

Найдис В. А. 2, 77
Найфельд М. Р. 10, 85
Нашатырь В. М. 5, 13
Неболюбов Ю. Е. 3, 39
Негненецкий И. Б. 3, 63; 9, 64
Нейман З. Б. 7, 52
Немировский Е. Л. 9, 73
Нетушил А. В. 2, 42; 7, 82;
8, 80; 10, 96
Нечаев Г. К. 9, 48
Никифоровский Н. Н. 5, 50

О

Обручева А. Д. 2, 71
Огородников С. И. 11, 67
Отважин Е. Ф. 12, 75

П

Павлов Г. М. 6, 9
Паян Х. Р. 11, 76
Панина И. К. 3, 63
Пантишин В. С. 9, 89
Пензинский В. Б. 12, 85
Пеккер И. И. 12, 50
Переполов Б. В. 7, 23; 9, 93
Петров Б. П. 9, 38
Петрова Н. Г. 9, 83
Пиневич М. М. 9, 48
Плюгачев В. К. 6, 36
Погорский В. И. 10, 74
Поливанов К. М. 4, 88
Полотовский Л. С. 10, 78
Поляков В. Е. 9, 93
Попков В. И. 8, 67
Пополова-Кьяндинская А. А. 7, 64
Поспелов Г. Е. 6, 14
Пресман С. М. 10, 94
Привальский Б. Я. 10, 44
Приклонский Е. Н. 7, 77
Протопопов Б. А. 5, 92
Радищев А. С. 1, 13
Райкин Ф. А. 2, 75; 10, 81
Речевская М. М. 4, 35
Чиличин М. Г. 4, 47; 12, 40
Чистосердов М. Г. 9, 93

Р

Рабинович А. Д. 6, 47
Рабкин Л. И. 10, 63
Ракушев Н. Ф. 2, 7
Рахимов Г. Р. 12, 70
Ремнев В. Ф. 5, 90
Ренне В. Т. 12, 55
Розанов Г. М. 9, 11
Розанов С. П. 11, 76
Розенберг Б. И. 3, 78
Розенблат М. А. 10, 38
Розенкранц А. С. 5, 67
Розовский Ю. А. 3, 17; 10, 13
Рокотян С. С. 10, 87
Романовский В. Б. 6, 68
Ростовцев Н. А. 5, 62
Рязанов Г. А. 11, 76

С

Салгус Г. К. 3, 74
Самурина Л. Л. 9, 64
Свенчанский А. Д. 11, 56
Секторов В. Р. 3, 11
Сербиновский Г. В. 8, 94; 9, 3
Сехниашвили Г. М. 1, 57

Сидлик Л. З. 8, 67
Сидоров К. В. 2, 96
Синьков В. М. 7, 23; 10, 94
Сирота И. М. 3, 77; 5, 23
Ситников О. П. 4, 38; 9, 93
Сиунов Н. С. 9, 93
Слежановский О. В. 3, 51
Смирнов В. А. 9, 89
Смирнов В. И. 9, 55
Соловов С. А. 6, 3
Соколов В. В. 4, 14
Соколов М. М. 2, 77
Соколов Н. Н. 12, 3
Соколов Ф. Ф. 69
Соколова К. И. 7, 78
Солдаткина Л. А. 12, 14
Сорокин П. Г. 10, 20
Сосунова В. Н. 6, 69
Спирidonов В. А. 4, 75
Староскольский Н. А. 7, 59
Степанов В. Г. 9, 93
Столов Л. И. 10, 43
Сукачев А. П. 11, 76
Сурков С. К. 2, 77
Сыромятников И. А. 1, 22;
2, 80; 5, 3; 6, 66; 9, 89

Т

Табачинский В. Ф. 11, 64
Тайц А. А. 3, 82; 10, 84
Танатар А. И. 5, 75
Тареев Б. М. 6, 57
Татко Б. С. 5, 81; 6, 74, 94
Трахтман Л. М. 9, 34
Трецеш И. И. 1, 38
Трофименко Д. Е. 9, 93;

У

Урусов И. Д. 2, 29

Ф

Файнитцкий В. М. 12, 55
Федоров А. Д. 7, 67
Ферсман А. А. 12, 87
Фетисов В. В. 2, 25; 8, 23
Фоменко Л. А. 12, 87
Фрид Е. С. 3, 22
Фрумкин А. Н. 2, 71
Фугенфиров М. И. 3, 81

Х

Харчев М. К. 7, 86
Харченко Р. П. 5, 30
Ходоров С. Е. 7, 78

Ц

Цверава Г. К. 6, 93
Цейров Е. М. 4, 42
Цекун Н. А. 8, 70
Цукерник Л. В. 12, 20

Ч

Чернич А. Б. 2, 13
Чернявский Ф. И. 2, 75; 10, 81
Четверикова М. М. 4, 35
Чиликин М. Г. 4, 47; 12, 40
Чистосердов М. Г. 9, 93

Ш

Шапиро Д. Н. 12, 87
Шарле Д. Л. 6, 96
Шарохин Г. И. 9, 89
Швецкий Б. И. 4, 23
Шелепенко В. А. 7, 78

Щ

Шернис А. Н. 16; 4, 91
Шнейберг Я. А. 1, 60; 11, 71
Шницер Л. М. 3, 86

Ш

Шкодин А. И. 10, 14
Шрамков А. Я. 12, 44
Штерн Г. М. 6, 51
Шулятьева Г. Н. 7, 78
Шур Д. А. 11, 56

Щ

Щедрин Н. Н. 1, 11

Щетинин А. П. 12, 89

Э

Эдельштейн А. С. 1, 48

Эзрина И. В. 6, 60

Ю

Юзвинская П. И. 10, 63
Юматов А. А. 4, 87, 89, 11, 76

Я

Янко-Триницкий А. А. 7, 71

Цена 8 руб.

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

ОРГАН АКАДЕМИИ НАУК СССР
И МИНИСТЕРСТВА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ
И ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР

Основан в 1880 г. Русским техническим обществом

Журнал рассчитан на широкие круги инженеров и научных работников, ведущих работу в различных областях электротехники.

В журнале систематически освещаются основные теоретические и практические вопросы, связанные с дальнейшей электрификацией всех отраслей народного хозяйства СССР, предусмотренной директивами XIX съезда КПСС по пятому пятилетнему плану.

Журнал „Электричество“ уделяет особое внимание вопросам внедрения в производство новой передовой техники. В журнале регулярно ведется раздел „Из опыта работы“ и печатаются обзоры, обобщающие опыт новаторов науки и техники.

Журнал „Электричество“ систематически освещает вопросы истории русской электротехники, информирует читателей в реферах и обзорах о важнейших материалах отечественной и иностранной электротехнической периодики. В журнале регулярно проводятся научно-технические дискуссии.

В журнале „Электричество“ участвуют видные ученые и специалисты — электротехники Советского Союза.

12 номеров в год
(144 печ. листа)

Подписная цена
96 руб.

Подписка на журнал „ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“ принимается
во всех отделениях Союзпечати и во всех почтовых
отделениях.