

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1954

  
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

6

ЖУРНАЛ  
ОСНОВАН  
в 1880 г.

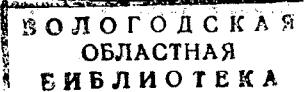
# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

6  
1954  
ИЮНЬ

ОРГАН АКАДЕМИИ НАУК СССР, МИНИСТЕРСТВА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ СССР И МИНИСТЕРСТВА  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Н. А. Мельников и А. Н. Шеренцис — Неполнофазные режимы дальних электропередач</b>	3
<b>Ю. А. Гаевенко — Дистанционная защита длинных и сильно нагруженных линий электропередачи</b>	8
<b>А. А. Ермилов — Комплектные подстанции массового применения</b>	14
<b>С. В. Страхов — О выборе системы координат при расчете переходных процессов в цепях с синхронными машинами</b>	20
<b>Р. Р. Харченко — Коррекция частотных характеристик вибраторного осциллографа</b>	26
<b>М. А. Быков — „Скользящий минимум“ при уравновешивании мостов переменного тока с плохой сходимостью</b>	35
<b>А. Д. Дроздов — Основные уравнения дифференциальных насыщающихся трансформаторов тока для релейной защиты</b>	39
<b>В. А. Лабунцов — Самораскачивание ионного преобразователя частоты при нагрузке на асинхронные двигатели</b>	46
<b>Г. М. Кнорринг — Светильники с решетчатыми затенителями для люминесцентных ламп</b>	53
<b>Я. Е. Зильберблат, М. А. Островский и С. Н. Федоткин — Применение люминесцентных ламп для наружного освещения</b>	58
<b>С. Ф. Рацковский — Измерение напряженности поля, используемого для диэлектрического нагрева</b>	62
<b>А. Б. Альтман — Постоянные магниты из порошков</b>	65
<b>Г. С. Кучинский, В. Т. Ренин и В. М. Файницкий — Выбор толщины диэлектрика для бумажных силовых конденсаторов</b>	70
<b>ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ</b>	
<b>В. А. Козлов и В. Д. Еремеев — Применение выключателей нагрузки для автоматического включения резерва</b>	75
<b>ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ</b>	
<b>Л. Д. Радунский — Н. Г. Славянов. К столетию со дня рождения</b>	78
<b>Н. Н. Славянов — Воспоминания об отце</b>	83
<b>ДИСКУССИИ</b>	
<b>Книга „Общая электротехника“ — От редакции. Книги по электроснабжению промышленных предприятий — А. А. Федоров, Б. А. Князевский, Ю. Л. Мукосеев. Новая схема и конструкция распределительного устройства электростанций — П. Г. Грудинский, Н. Н. Кувшинский, С. Н. Семенов, Е. А. Бугринов</b>	85
<b>ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ</b>	
<b>Новая конструкция двигателя с горизонтально вибрирующим якорем. Подводный кабель через Ламанш</b>	89
<b>ХРОНИКА</b>	
<b>Годовые итоги научно-исследовательских работ на конференции МЭИ им. Молотова. Заслуженный деятель науки и техники Л. И. Сиротинский</b>	90
<b>БИБЛИОГРАФИЯ</b>	
<b>М. Д. Бочарова — Книга М. И. Радовского „Борис Семенович Якоби“</b>	92
<b>А. А. Сиротин — Книга Л. П. Петрова „Схемы контакторного управления электроприводами“</b>	95
<b>Новые книги по электротехнике, электротехнике и электроэнергетике</b>	96



**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

**главный редактор Н. Г. Дроздов,  
зам. главного редактора И. А. Сыромятников,  
члены редколлегии: К. А. Андрианов, Г. В. Буткевич, А. А. Глазунов, В. А. Голубцова,  
Е. Г. Комар, М. П. Костенко, А. М. Федосеев, М. Г. Чилинин, М. А. Шателен.**

**Адрес редакции: Москва, Б. Черкасский пер., д. № 2, тел. К 4-24-80.  
Адрес для телеграмм: Москва Электротранс.  
Адрес для корреспонденции: Москва, Главный почтамт,  
почтовый ящик № 648.**

# Неполнофазные режимы дальних электропередач<sup>1</sup>

Кандидат техн. наук, доц. Н. А. МЕЛЬНИКОВ

Всесоюзный заочный энергетический институт

Инж. А. Н. ШЕРЕНЦИС

Теплоэлектропроект

Длинная линия электропередачи, по которой передаются значительные мощности, должна иметь более высокую эксплуатационную надежность, чем обычные линии. Авария на такой линии может причинить заметный ущерб народному хозяйству, так как она оказывается на режиме работы всей приемной энергосистемы. При проектировании длинной линии необходимо предусматривать целый ряд мероприятий, обеспечивающих ее надежную эксплуатацию.

Длинные линии электропередачи, как правило, проектируются двухцепными, вдоль их трасс сооружаются переключательные посты или промежуточные подстанции. Это дает возможность в постепеных режимах — при отключении одной цепи на каком-либо участке линии — устойчиво передавать возможно большую мощность. Кроме того, надежность электропередачи обеспечивается запасами прочности, предусматриваемыми в конструкциях металлических опор линий, высоким уровнем грозоупорности, исключающим перекрытие изоляции на опоре и в пролете при прямых ударах молний, значительным расстоянием между отдельными фазами (порядка 10 м), при котором междуфазные короткие замыкания оказываются маловероятными, и т. д.

К числу мероприятий, позволяющих обеспечить требуемую пропускную способность электропередачи и повысить запас устойчивости ее работы в нормальных режимах, относятся: применение расщепленных проводов, снижение реактивности генераторов и трансформаторов, применение специальных регуляторов возбуждения, продольная компенсация индуктивности линии с помощью конденсаторов и т. д. Помимо этого, приходится предусматривать мероприятия, повышающие запас динамической устойчивости электропередачи, к числу которых относятся: быстродействующее отключение, устройства АПВ, включение нагрузочных активных сопротивлений на шинах станции, включение активных сопротивлений в нейтрали обмоток высшего напряжения повышающих трансформаторов и др.

Однако, несмотря на применение перечисленных мероприятий, длинная линия напряжением,

Показана целесообразность применения неполнофазных режимов для повышения эксплуатационной надежности работы длинных двухцепных линий электропередачи. Рассмотрена возможность уменьшения получаемой несимметрии токов и напряжений в симметричной части системы путем искусственного симметрирования режима работы электропередачи.

например, 400 кв при передаче по ней наибольшей мощности порядка 1 млн. квт все же имеет сравнительно малый запас устойчивости. Поэтому для сохранения необходимого

запаса статической устойчивости при отключении одной из параллельных цепей на каком-либо участке линии передаваемая мощность должна быть несколько снижена. Одновременное отключение одной из цепей на двух различных участках линии (например, в случае отказа в работе линейного выключателя на одном из переключательных постов) может привести к нарушению синхронизма.

При одностороннем отключении обеих цепей линии и определенном сочетании параметров в некоторых местах электропередачи возможно появление внутренних перенапряжений, могущих быть опасными для изоляции и могущих вызвать затруднения в работе выключателей. Для ограничения или ликвидации этих перенапряжений нужны защитные мероприятия.

Следует учитывать, что при длине линии порядка 1 тыс. км вероятность отключения отдельных ее участков значительно увеличивается не только в связи с устойчивыми повреждениями, но главным образом вследствие необходимости регулярного проведения на линии профилактических и ремонтных работ. При этом одновременные отключения вероятны не только на разных участках линии, но и на одном и том же участке.

**Целесообразность применения неполнофазных режимов работы линии.** Путем применения раздельного управления фазами, которое уже применяется на одноцепных линиях более низкого напряжения, можно существенно повысить надежность работы длинной линии. При этом не потребуется сколько-нибудь значительных затрат дополнительных средств, материалов и оборудования.

Как показывает опыт эксплуатации линий 220 кв на металлических опорах, наиболее частой причиной повреждений являются однофазные короткие замыкания. Для линий 400 кв этот вид повреждения также является практически наиболее вероятным.

Если при однофазном коротком замыкании на линии поврежденная фаза будет автоматически отключена с обеих сторон, а две другие фазы той же цепи останутся в работе, то они вместе со второй параллельной цепью обеспечат

<sup>1</sup> Статья представляет изложение содержания доклада, прочитанного на заседании Комиссии по дальним электропередачам ЭНИИ Академии наук СССР.

устойчивую передачу наибольшей мощности. Таким образом, на поврежденном участке линии в работе останутся пять фаз из шести, а не три, как это имело бы место при отключении всей цепи. В дальнейшем такой режим работы линии будем условно называть пятифазным.

При переходе от полнофазного режима работы линии к пятифазному эквивалентное сопротивление электрической цепи для токов прямой последовательности увеличивается в меньшей мере, чем при отключении всей цепи на том же участке. В случае раздельного управления фазами особенно значительно повышается надежность работы линии при одновременных отключениях.

Применение пофазного управления приводит к тому, что линия в отдельных случаях будет работать в неполнофазных режимах. Наиболее частым видом таких режимов будет работа с одной отключенной фазой на каком-либо одном участке линии. Однако возможны и другие, более сложные виды этих режимов. Например, возможно отключение на каждом из двух участков по одной фазе (одноименной или разноименной), возможно также отключение на одном участке двух фаз.

С точки зрения устойчивости одновременное отключение отдельных фаз на различных участках линии допустимо не только тогда, когда эти фазы одноименные, но и тогда, когда они разноименные. При одновременном отключении двух разноименных фаз на одном участке линии или на разных участках режим работы линии по условиям устойчивости приближается к ее режиму при полностью отключенной цепи на одном из участков линии. Таким образом, при раздельном управлении фазами два одновременных отключения в большинстве случаев оказываются легче, чем одно отключение при трехфазном управлении. Только одновременное отключение двух одноименных фаз на одном участке линии приводит по существу к двухфазному режиму работы электропередачи и требует по условиям устойчивости снижения передаваемой мощности. Для того чтобы избежать таких двухфазных режимов, можно предложить автоматическое переключение проводов линии с одной фазы на другую, приводящее к пятифазному режиму.

В эксплуатации возможны также случаи отключения одной из фаз одной цепи линии в то время, когда вторая цепь на этом участке уже отключена. При этом предполагается, что перед отключением фазы по линии передавалась соответственно сниженная мощность. В этом случае по оставшимся двум фазам по условиям устойчивости можно передавать почти половинную мощность.

Кроме раздельного управления фазами линии некоторые преимущества может дать раздельное управление фазами батарей конденсаторов установки продольной компенсации и фазами реакторов поперечной компенсации, что также приводит к неполнофазным или несимметричным режимам работы линии электропередачи.

**Особенности неполнофазных режимов работы.** Необходимо отметить, что неполнофазные режи-

мы работы длинной линии электропередачи обладают недостатками, затрудняющими их широкое применение.

Отключение отдельных фаз линии или компенсирующих устройств приводит к возникновению несимметрии токов и напряжений. Приходится считаться с появлением токов и напряжений обратной последовательности во всей электрической системе, а также токов и напряжений нулевой последовательности в линиях электропередачи с глухим заземлением нейтрали.

Несимметрия токов затрудняет осуществление надежной релейной защиты линии с применением существующих схем; наибольшую сложность для релейной защиты представляют повторные неполнофазные отключения.

Наличие токов нулевой последовательности в линии усиливает мешающие влияния на низкочастотные каналы связи.

Токи обратной последовательности, протекая по обмоткам статоров гидрогенераторов, вызывают дополнительный нагрев роторов генераторов и их вибрации [Л. 1].

«Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей» допускают длительную работу генераторов в несимметричном режиме. Согласно этим Правилам при полной нагрузке неравенство токов в фазах турбогенераторов не должно превышать 10%, а в фазах гидрогенераторов и синхронных компенсаторов — 20%. Этими величинами определяется длительно допустимое значение токов обратной последовательности при полной нагрузке: для турбогенераторов — около 6%, для гидрогенераторов — около 12% номинального тока.

Вопрос о допустимой величине токов нулевой последовательности на отдельных участках линии должен решаться в зависимости от взаимного расположения трасс линий электропередачи и линий связи. Расчеты мешающих влияний<sup>2</sup>, проведенные для некоторых конкретных случаев взаимного расположения линий связи и линий электропередачи, работающей в неполнофазном режиме, показали, что мешающие влияния на низкочастотные каналы телефонной связи не превышают установленных норм. Следовательно, в ряде случаев никакого переустройства телефонных цепей не потребуется.

Результаты расчетов мешающих влияний на цепи быстродействующего телеграфа показывают, что переустройство значительной части телеграфных цепей требуется независимо от применения неполнофазных режимов и к тому же оно оказывается сравнительно небольшим.

Следует заметить, что в нормативах [Л. 2] на внешние помехи от линий электропередачи выделено только 6...12% допустимых суммарных помех. Это свидетельствует о недостаточной обоснованности норм мешающих влияний и о необходимости их пересмотра.

При раздельном управлении фазами должна быть проверена возможность работы линии в не-

<sup>2</sup> Расчеты произведены А. М. Старицкой,

полнофазных режимах по условиям допустимого для изоляции аппаратов повышения напряжения на отдельных фазах, а также по условиям допустимой для потребителей электроэнергии несимметрии напряжений на шинах приемных подстанций. Следует отметить, что несимметрия напряжений достигает наибольших значений на неполнофазной части электропередачи.

Раздельное управление фазами приводит к необходимости рассмотрения и некоторых смежных вопросов. Так, возникает вопрос о величине тока замыкания на землю, протекающего через дугу после отключения поврежденной фазы линии. Поскольку емкостный ток на участке линии длиной 200...300 км равен примерно 20...40 а, то возможно, что дуга сопровождающего тока в некоторых случаях не погаснет после отключения только одной поврежденной фазы.

После того как дуга погаснет, отключенный провод получит некоторое напряжение относительно земли, величина которого в различных точках участка линии не одинакова. Определение этого напряжения требуется, например, для решения вопроса о способах проведения пофазных ремонтов линии.

Дополнительного исследования и рассмотрения требуют случаи повторного неполнофазного отключения и др.

**Симметрирование режима работы.** Чтобы создать наиболее благоприятные условия для работы электропередачи в целом, необходимо стремиться к наибольшему уменьшению внешней несимметрии токов и напряжений, т. е. несимметрии, получаемой в неполнофазной части системы. Снижение внешней несимметрии целесообразно даже в тех случаях, когда она находится в пределах, допускаемых нормами, так как благодаря этому снижению облегчаются условия работы генераторов (особенно в отношении вибрации, которая до начала работы генератора в системе практически не может быть определена), уменьшаются мешающие влияния на линии связи и облегчается работа релейной защиты на большей части электрической цепи (за исключением неполнофазного участка линии).

В целях симметрирования неполнофазных режимов длинной линии, оборудованной устройствами продольной компенсации, целесообразно вместе с отключением фазы на одном из участков линии автоматически или вручную отключать одноименную фазу одной из параллельных цепей установки продольной компенсации. Благодаря этому величина суммарного индуктивного сопротивления поврежденной фазы в неполнофазном режиме будет мало отличаться от величины этого сопротивления в нормальном режиме линии электропередачи.

Параметры отдельных цепей установки продольной компенсации должны быть выбраны такими, чтобы они позволяли в наибольшей мере симметрировать параметры отключаемого участка линии. Это мероприятие практически не связано с дополнительными затратами.

Практически линия электропередачи может быть разделена переключательными постами на

неравные части, поэтому изменение емкостного сопротивления в схеме продольной компенсации может приводить к различным результатам в отношении симметрирования в зависимости от положения неполнофазного участка.

Исследование показало (методика расчета приведена в приложении), что при отключении фазы линии на одном из ее участков значение коэффициента несимметрии токов по обратной последовательности может оказаться еще допустимым для гидрогенераторов, но уже приближающимся к предельному значению. В случае же одновременного отключения одноименной фазы на двух участках линии коэффициент несимметрии выходит за допускаемое нормами значение. Симметрирование путем увеличения емкостного сопротивления соответствующей фазы установки продольной компенсации заметно уменьшает коэффициент несимметрии токов. Даже при одновременном отключении одноименной фазы на двух участках линии он может остаться в допускаемых пределах.

Таким образом, по условиям работы гидрогенераторов практически возможна длительная эксплуатация длинной двухцепной линии в неполнофазных режимах при условии симметрирования этих режимов с помощью увеличения емкостного сопротивления соответствующей фазы установки продольной компенсации.

К недостаткам симметрирования с помощью установки продольной компенсации относятся: некоторое увеличение несимметрии токов и напряжений в пределах самого несимметричного участка электропередачи и некоторая перегрузка конденсаторов.

По заводским данным перегрузка конденсаторов на 25% допустима в течение 4 час. Допустимое время работы конденсаторов при перегрузке, которая будет иметь место в действительности, повидимому будет значительно выше 4 час. Это позволит применять несимметричные режимы не только для облегчения условий прохождения осенне-зимнего максимума, но и весеннего паводка, и не только при аварийном отключении одной фазы линии на каком-либо из ее участков, но и для пофазного ремонта одновременно линии электропередачи и батарей конденсаторов.

Осмотр или ремонт части установки продольной компенсации может производиться или путем полного отключения одной из ее параллельных цепей, или путем отключения одной из фаз этой цепи. В тех случаях, когда ремонт или осмотр конденсаторов необходим, а отключение целой цепи установки продольной компенсации по условиям работы электропередачи допущено быть не может, целесообразен пофазный ремонт батарей конденсаторов, хотя при полнофазной работе самой линии это и повлечет за собой некоторую перегрузку неполной фазы конденсаторов.

Ремонт проводов линии рекомендуется производить пофазно, с двусторонним отключением ремонтируемой фазы, но без ее заземления. Это требует проведения ремонтных работ под пониженным напряжением (порядка 22 кв), т. е. с применением передвижных изолирующих кон-

структур и с участием квалифицированного персонала. Возможно одновременное проведение ремонтных работ в нескольких местах данного участка линии.

С помощью различных средств симметрирования в большинстве случаев удается лишь снизить степень несимметрии, но не устранить ее. Осточная несимметрия может быть связана и с другими причинами. Между тем длительное существование несимметрии в электрической системе в условиях нормальной работы последней является нежелательным. Поэтому на длинных линиях электропередачи желательно применение специальных симметрирующих устройств, устанавливаемых на обоих концах электропередачи или только на передающем ее конце.

К таким устройствам могут быть отнесены, например, добавочные трансформаторы, включаемые у нейтралей обмоток высшего напряжения основных трансформаторов и позволяющие регулировать под нагрузкой продольную и поперечную э. д. с. в каждой из фаз в отдельности [Л. 3] или систему э. д. с. обратной последовательности. Сюда же относятся пофазно регулируемые реактивные сопротивления, включенные в цепь генераторного напряжения [Л. 4], и пофазно регулируемые поперечно включенные реакторы. С помощью двух последних устройств не удается полностью устранить несимметрию ни в одной из цепей электрической системы, но можно достигнуть значительного снижения ее коэффициентов во всей электрической системе, за исключением полнофазной цепи, включенной параллельно с неполнофазной.

- Симметрирование может быть применено даже при двухфазном режиме работы линий электропередачи, что позволит значительно увеличить передаваемую при этом режиме мощность. Мощность симметрирующих устройств в этом случае должна быть достаточно большой, хотя регулирование может быть ступенчатым.

Выбор наиболее целесообразных средств симметрирования режимов работы длинной линии электропередачи должен быть оправдан соответствующими технико-экономическими расчетами.

**Выводы.** 1. Применение неполнофазных режимов работы позволяет значительно улучшить эксплуатационные показатели длинной линии электропередачи без существенных дополнительных затрат. Несимметрия токов и напряжений в большинстве случаев оказывается допустимой и только в отдельных случаях может потребоваться снижение передаваемой мощности или применение дополнительных устройств.

2. Препятствием широкому применению неполнофазных режимов работы длинных линий электропередачи в настоящее время является главным образом недостаточная разработка возникающих при этом вопросов релейной защиты.

3. Для симметрирования неполнофазных режимов может быть использовано разделное управление фазами устройств продольной и поперечной компенсации линии электропередачи. Это управление может осуществляться вручную.

4. Широкое применение неполнофазных режимов работы длинных линий электропередачи требует разработки специальных симметрирующих устройств.

5. Коэффициент несимметрии напряжений (по обратной последовательности) на питающих шинах подстанций является одним из показателей качества электрической энергии (наряду с частотой и отклонениями напряжения прямой последовательности) и должен быть нормирован.

6. Нормы мешающих влияний для телеграфных цепей должны быть пересмотрены.

**Приложение. Методика расчетов несимметричных режимов работы.** Несмотря на сравнительную сложность практического анализа различных конкретных случаев несимметричной работы длинной линии при наличии нескольких участков с различными параметрами фаз, все же возможно составить схему прямой последовательности, позволяющую учесть влияние этих параметров на режим работы электропередачи в целом. Такой метод расчета аналогичен применению так называемых комплексных схем, хорошо известных для простейших случаев несимметрии [Л. 3], и применим как при расчете любого режима работы электропередачи, так и при расчетах устойчивости.

В рассматриваемом случае из всей электрической системы можно выделить часть электропередачи, включающую все участки с неодинаковыми параметрами фаз и называемую в дальнейшем условно несимметричной, а статичную часть системы, в дальнейшем называемую симметричной, представить обычными параметрами прямой, обратной и нулевой последовательностей.

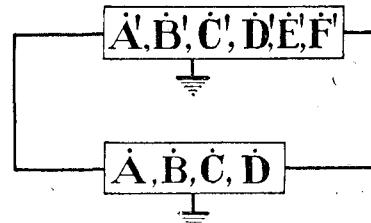


Рис. 1.

Пусть несимметричный участок электропередачи является пассивным и характеризуется полными матрицами обобщенных параметров  $\dot{A}$ ,  $\dot{B}$ ,  $\dot{C}$  и  $\dot{D}$ , а симметричная часть электрической системы является активной и характеризуется диагональными матрицами пассивных параметров  $\dot{A}'$ ,  $\dot{B}'$ ,  $\dot{C}'$  и  $\dot{D}'$ , и линейными матрицами активных параметров  $\dot{E}'$  и  $\dot{F}'$  (рис. 1):

$$\dot{E}' = \begin{vmatrix} \dot{E}_1 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad \text{и} \quad \dot{F}' = \begin{vmatrix} \dot{F}_1 & 0 & 0 \end{vmatrix}.$$

Симметричная часть электрической системы может быть представлена отдельно для каждой последовательности, причем представление схемы прямой последовательности может быть ограничено условиями на концах несимметричного участка электропередачи (рис. 2).

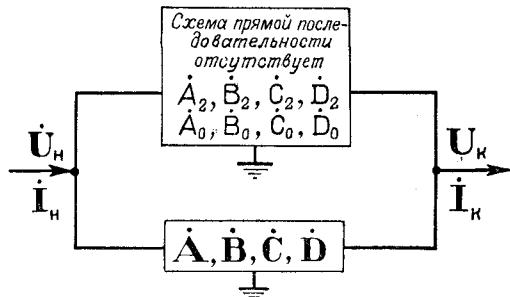


Рис. 2.

Полученная схема может рассматриваться как эквивалентный многофазный несимметричный трехполюсник с известными параметрами  $\dot{A}_\vartheta$ ,  $\dot{B}_\vartheta$ ,  $\dot{C}_\vartheta$ , и  $\dot{D}_\vartheta$ , которыми связываются матрицы величин на концах:

$$\dot{U}_n = \begin{vmatrix} \dot{U}_{1n} & \dot{U}_{2n} & \dot{U}_{0n} \end{vmatrix},$$

$$\dot{I}_n = \begin{vmatrix} \dot{I}_{1n} & 0 & 0 \end{vmatrix},$$

$$\dot{U}_k = \begin{vmatrix} \dot{U}_{1k} & \dot{U}_{1k} & \dot{U}_{0k} \end{vmatrix},$$

$$\dot{I}_k = \begin{vmatrix} \dot{I}_{1k} & 0 & 0 \end{vmatrix},$$

в соответствии со следующими уравнениями [Л.5]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_n &= \dot{U}_k \dot{A}_\vartheta + \dot{I}_k \dot{B}_\vartheta, \\ \dot{I}_n &= \dot{U}_k \dot{C}_\vartheta + \dot{I}_k \dot{D}_\vartheta. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь матрицы всех параметров трехполюсника имеют одинаковую структуру:

$$\dot{N} = \begin{vmatrix} \dot{N}_{11} & \dot{N}_{12} & \dot{N}_{10} \\ \dot{N}_{21} & \dot{N}_{22} & \dot{N}_{20} \\ \dot{N}_{01} & \dot{N}_{02} & \dot{N}_{00} \end{vmatrix}.$$

Из уравнений трехполюсника (1), записанных в матрицах, получается система линейных алгебраических уравнений с постоянными коэффициентами:

$$\dot{U}_{1n} = \dot{U}_{1k} \dot{A}_{11} + \dot{U}_{2k} \dot{A}_{21} + \dot{U}_{0k} \dot{A}_{01} + \dot{I}_{1k} \dot{B}_{11}, \quad (2)$$

$$\dot{U}_{2n} = \dot{U}_{1k} \dot{A}_{12} + \dot{U}_{2k} \dot{A}_{22} + \dot{U}_{0k} \dot{A}_{02} + \dot{I}_{1k} \dot{B}_{12}, \quad (3)$$

$$\dot{U}_{0n} = \dot{U}_{1k} \dot{A}_{10} + \dot{U}_{2k} \dot{A}_{20} + \dot{U}_{0k} \dot{A}_{00} + \dot{I}_{1k} \dot{B}_{10}, \quad (4)$$

$$\dot{I}_{1n} = \dot{U}_{1k} \dot{C}_{11} + \dot{U}_{2k} \dot{C}_{21} + \dot{U}_{0k} \dot{C}_{01} + \dot{I}_{1k} \dot{D}_{11}, \quad (5)$$

$$0 = \dot{U}_{1k} \dot{C}_{12} + \dot{U}_{2k} \dot{C}_{22} + \dot{U}_{0k} \dot{C}_{02} + \dot{I}_{1k} \dot{D}_{12}, \quad (6)$$

$$0 = \dot{U}_{1k} \dot{C}_{10} + \dot{U}_{2k} \dot{C}_{20} + \dot{U}_{0k} \dot{C}_{00} + \dot{I}_{1k} \dot{D}_{10}. \quad (7)$$

Из уравнений (5) следует, что напряжения  $\dot{U}_{2k}$  и  $\dot{U}_{0k}$  определяются величинами  $\dot{U}_{1k}$  и  $\dot{I}_{1k}$ :

$$\dot{U}_{2k} = \dot{U}_{1k} \dot{A}'_2 + \dot{I}_{1k} \dot{B}'_2,$$

$$\dot{U}_{0k} = \dot{U}_{1k} \dot{A}'_0 + \dot{I}_{1k} \dot{B}'_0,$$

где

$$\dot{A}'_2 = \frac{\dot{C}_{02} \dot{C}_{10} - \dot{C}_{00} \dot{C}_{12}}{\dot{C}_{22} \dot{C}_{00} - \dot{C}_{20} \dot{C}_{02}}, \quad \dot{A}'_0 = \frac{\dot{C}_{22} \dot{C}_{10} - \dot{C}_{20} \dot{C}_{12}}{\dot{C}_{20} \dot{C}_{02} - \dot{C}_{22} \dot{C}_{00}},$$

$$\dot{B}'_2 = \frac{\dot{C}_{02} \dot{D}_{10} - \dot{C}_{00} \dot{D}_{12}}{\dot{C}_{22} \dot{C}_{00} - \dot{C}_{20} \dot{C}_{02}}, \quad \dot{B}'_0 = \frac{\dot{C}_{22} \dot{D}_{10} - \dot{C}_{20} \dot{D}_{12}}{\dot{C}_{20} \dot{C}_{02} - \dot{C}_{22} \dot{C}_{00}}.$$

Но при этом между величинами прямой последовательности на концах несимметричного участка электропередачи получается простая линейная зависимость в виде уравнений обычного пассивного трехполюсника:

$$\dot{U}_{1n} = \dot{U}_{1k} \dot{A} + \dot{I}_{1k} \dot{B},$$

$$\dot{I}_{1n} = \dot{U}_{1k} \dot{C} + \dot{I}_{1k} \dot{D},$$

где

$$\dot{A} = \dot{A}_{11} + \Delta \dot{A},$$

$$\dot{B} = \dot{B}_{11} + \Delta \dot{B},$$

$$\dot{C} = \dot{C}_{11} + \Delta \dot{C},$$

$$\dot{D} = \dot{D}_{11} + \Delta \dot{D},$$

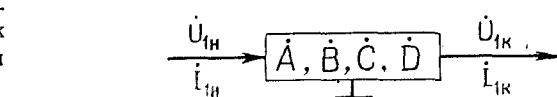


Рис. 3.

причем

$$\Delta \dot{A} = \dot{A}'_2 \dot{A}_{21} + \dot{A}'_0 \dot{A}_{01},$$

$$\Delta \dot{B} = \dot{B}'_2 \dot{A}_{21} + \dot{B}'_0 \dot{A}_{01},$$

$$\Delta \dot{C} = \dot{A}'_2 \dot{C}_{21} + \dot{A}'_0 \dot{C}_{01},$$

$$\Delta \dot{D} = \dot{B}'_2 \dot{C}_{21} + \dot{B}'_0 \dot{C}_{01}.$$

Напряжения  $\dot{U}_{2n}$  и  $\dot{U}_{0n}$  также определяются:

$$\dot{U}_{2n} = \dot{U}_{1k} (\dot{A}_{12} + \dot{A}'_2 \dot{A}_{22} + \dot{A}'_0 \dot{A}_{02}) + \dot{I}_{1k} (\dot{B}_{12} + \dot{B}'_2 \dot{A}_{22} + \dot{B}'_0 \dot{A}_{02}),$$

$$\dot{U}_{0n} = \dot{U}_{1k} (\dot{A}_{10} + \dot{A}'_2 \dot{A}_{20} + \dot{A}'_0 \dot{A}_{00}) + \dot{I}_{1k} (\dot{B}_{10} + \dot{B}'_2 \dot{A}_{20} + \dot{B}'_0 \dot{A}_{00}).$$

Параметры  $\dot{A}_{11}$ ,  $\dot{B}_{11}$ ,  $\dot{C}_{11}$  и  $\dot{D}_{11}$  являются обобщенными параметрами несимметричного участка электропередачи, непосредственно связывающими величины прямой последовательности в пределах самого несимметричного участка, а параметры  $\Delta \dot{A}$ ,  $\Delta \dot{B}$ ,  $\Delta \dot{C}$  и  $\Delta \dot{D}$  дополняют схему прямой последовательности, позволяя учесть влияние на величины прямой последовательности несимметричности режима работы всей электрической системы (рис. 3).

По величинам напряжений и токов прямой последовательности, найденным из этой схемы для одного из концов несимметричного участка, можно определить токи и напряжения обратной и нулевой последовательностей для того же места электропередачи, а затем по схеме соответствующей последовательности — определить токи и напряжения этой последовательности в любом месте симметричной части системы. Пользуясь параметрами отдельных участков несимметричной части электропередачи, можно определить токи и напряжения всех последовательностей в любом месте самой несимметричной части электропередачи, т. е. полностью определить режим работы всей электрической системы.

Указанный расчет может выполняться как в обобщенных параметрах, так и по схеме с сосредоточенными параметрами продольных и поперечных звеньев. В последнем случае для выполнения расчетов может быть применена электрическая модель переменного тока. Можно показать что известные комплексные схемы для простейших случаев неполнофазной работы линий электропередачи получаются из данного, более общего решения, изложенного в настоящей статье лишь конспективно.

#### Литература

1. Г. Н. Тер-Газарян и Б. Б. Тимофеев. Несимметричный режим крупного гидрогенератора. Эл. станции, № 7, 1952.

2. Правила ограждения сооружений связи и сигнализации от вредного действия установок сильного тока. Госэнергоиздат, 1944.

3. Н. А. Мельников. Расчеты режимов работы сетей электрических систем. Госэнергоиздат, 1950.

4. И. А. Сыромятников. Режимы работы синхронных генераторов. Госэнергоиздат, 1952.

5. Н. А. Мельников. Метод расчета сложных несимметричных многофазных электрических систем. Труды Всесоюзного заочного энергетического института, вып. 3, Госэнергоиздат, 1954.

[30. 1. 1954]



# Дистанционная защита длинных и сильно нагруженных линий электропередачи

Инж. Ю. А. ГАЕВЕНКО

Теплоэлектропроект

Увеличение протяженности высоковольтных линий и рост их нагрузок требует разработки мероприятий, позволяющих отстраивать защиту от режимов нагрузок. В практике последних лет большое распространение получили дистанционные защиты с характеристиками, позволяющими осуществить эту отстройку.

В том случае, когда входное сопротивление линии при всех возможных токах нагрузки заметно больше сопротивления на зажимах реле при коротких замыканиях, можно применить простейшую защиту полного сопротивления. Чувствительность дистанционных органов этой защиты не зависит от угла между сопротивлением на зажимах реле и осью активных сопротивлений (рис. 1).

Однако уже на линиях средней протяженности при передаче по ним большой мощности отстройка защиты полного сопротивления от нагрузок становится затруднительной. В настоящее время на таких линиях применяются защиты с дистанционными реле, чувствительность которых к сопротивлениям на их зажимах зависит от угла между током и напряжением, которые подводятся к реле, т. е. от угла сопротивления на зажимах реле.

Отстройка такой защиты от нормальных эксплуатационных режимов основывается на том, что при нагрузке, приближающейся к максимально допустимой, преобладает передача активной мощности и угол между входным сопротивлением линии и осью активных сопротивлений обычно не превышает  $30^\circ$ , в то время как угол сопротивления самих линий равен  $70^\circ$  и выше.

Одним из видов дистанционных органов, чув-

ствительность которых зависит от угла между подводимыми к реле током и напряжением, является направленное реле сопротивления (мометр). Его характеристика имеет вид

окружности, проходящей через начало координат, причем диаметр этой окружности, проведенный из начала координат, по своему направлению обычно совпадает с отрезком, изображающим сопротивление участка линии до конца защищаемой зоны (рис. 2).

Однако в ряде случаев дистанционная защита с направленным реле сопротивления не удовлетворяет требованиям отстройки от режимов нагрузки. В этих случаях приходится применять ограничительные реле, что сильно усложняет схему защиты, требует согласования работы основных и вспомогательных органов и создает ряд других трудностей. Поэтому желательно создание реле, имеющего не круговую, а сплюснутую, например эллиптическую, характеристику. Такое реле, у которого степень сплюснутости характеристики регулируется, может обеспечить отстройку от режимов нагрузки практически во всех возможных случаях, а также уменьшить влияние качаний на работу защиты. Создать реле с характеристиками, отличными от окружности или прямой линии, можно лишь при условии применения в их схемах выпрямителей, насыщающихся трансформаторов, ламп и других нелинейных элементов.

Объем настоящей статьи не позволяет рассмотреть все пути осуществления дистанционных органов с эллиптическими характеристиками, поэтому рассмотрим лишь один из них, основанный на применении сухих полупроводниковых выпрямителей. Принципиальная схема осуществленного таким образом дистанционного органа<sup>1</sup> представлена на рис. 3.

Чувствительное поляризованное реле имеет три отдельных идентичных рабочих обмотки, на которые подаются следующие напряжения:

$$U_1 = k|I(Z_1 + Z_2)|; \quad U_2 = -k|\dot{U} - iZ_1|;$$
$$U_3 = -k|\dot{U} - iZ_2|,$$

где  $\dot{U}$  — напряжение между поврежденными фазами линии;

<sup>1</sup> Теоретические и экспериментальные исследования этой схемы автор проводил совместно с С. Я. Петровым.

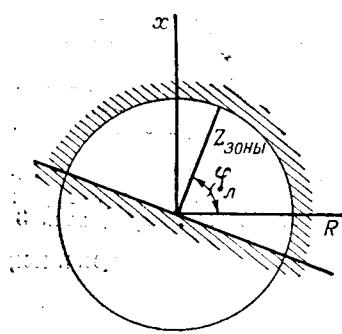


Рис. 1. Зона действия направленной защиты полного сопротивления.

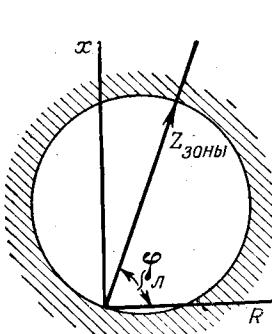


Рис. 2. Зона действия направленного реле сопротивления (мометра).

$i$  — соответствующая этому напряжению разность фазных токов;  
 $Z_1$  и  $Z_2$  — радиусы-векторы двух точек комплексной плоскости, являющихся, как показано ниже, фокусами эллипса;  
 $Z_1 + Z_2$  — сумма этих векторов, соответствующая оси эллипса, проходящей через начало координат.

Действующий момент реле будет равен:

$$M = k(|i(Z_1 + Z_2)| - |\dot{U} - iZ_1| - |\dot{U} - iZ_2|) - M_{\text{max}}. \quad (1)$$

Граница зоны действия реле будет изображаться эллиптической кривой, в чем легко убедиться, приравняв выражение (1) нулю и разделив его на  $k_1 I$ . Если, кроме этого, заменить  $\frac{\dot{U}}{I}$  на  $Z$ , то получим:

$$|Z_1 + Z_2| - |Z - Z_1| - |Z - Z_2| - \frac{M_{\text{max}}}{k_1 I} = 0. \quad (2)$$

Так как  $Z_1 + Z_2 = \text{пост}$  и при заданном токе  $\frac{M_{\text{max}}}{k_1 I} = \text{пост}$ , то

$$|Z - Z_1| + |Z - Z_2| = \text{пост},$$

т. е. сумма расстояний от точки  $Z$ , изображающей сопротивление на зажимах реле при коротком замыкании на границе зоны действия, до двух неподвижных точек  $Z_1$  и  $Z_2$  есть величина постоянная. Этому условию удовлетворяют точки эллипса с фокусами, определяемыми радиусами-векторами  $Z_1$  и  $Z_2$  (рис. 4).

Из изложенного следует, что при изменении тока рассматриваемый эллипс заменяется другим, несколько отличающимся по величине, софокусным эллипсом. Величина эллипса изменяется тем меньше, чем чувствительнее поляризованное реле, т. е. чем меньше его механический момент по сравнению с рабочим моментом.

Таким образом, при наличии достаточно чувствительного поляризованного реле дистанционный орган с эллиптической характеристикой, имеющей требуемые выходные параметры, в принципе может быть осуществлен. Однако практи-

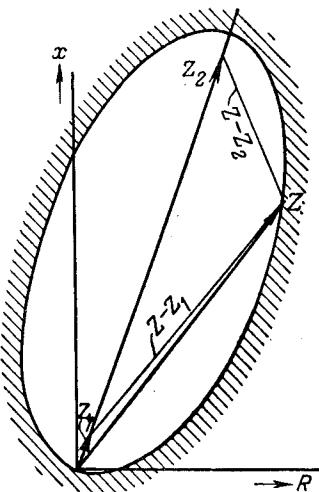


Рис. 4. Зона действия дистанционного реле с эллиптической характеристикой.

ческое создание его встречает ряд серьезных трудностей.

Реле с эллиптической характеристикой должно иметь три по возможности независимых регулировки: 1) регулировку уставки, т. е. длины оси, по которой направлен вектор, изображающий сопротивление отрезка линии до конца защищаемой зоны, причем в качестве этой оси наиболее удобно брать большую ось эллипса, так как тогда  $Z_1$ ,  $Z_2$  и  $Z_1 + Z_2$  будут коллинеарными векторами и их практическое получение наиболее просто; 2) регулировку угла максимальной чувствительности, которая необходима для того, чтобы иметь возможность по желанию изменять наклон большой оси эллипса и этим выбирать характеристики, соответствующие углу сопротивления защищаемой линии; 3) регулировку эксцентричности, т. е. степени сплюснутости эллипса.

Анализ и эксперименты показывают, что получение перечисленных, совершенно независимых регулировок затруднительно. Для этого необходимо по возможности устраниć влияние отдельных контуров защиты друг на друга.

К реле должны подводиться постоянные токи, пропорциональные указанным выше модулям векторных величин. Следовательно, схема должна иметь выпрямляющие и сглаживающие устройства.

Применение для сглаживания выпрямленных токов параллельных конденсаторов, последовательных дросселей или их комбинаций неприемлемо, так как противоречит требованию быстродействия. Поэтому приходится предварительно с помощью соответствующих устройств разлагать переменный ток на сдвинутые по фазе слагающие и только после этого выпрямлять каждую из этих слагающих в отдельности и суммировать их, добиваясь требуемой степени сглаживания.

Введение в схему сухих полупроводниковых выпрямителей вносит нелинейность, сильно увеличивающую зависимость параметров эллипса от тока. Для уменьшения нелинейности необходимо вводить в схему соответствующие компенсирующие устройства.

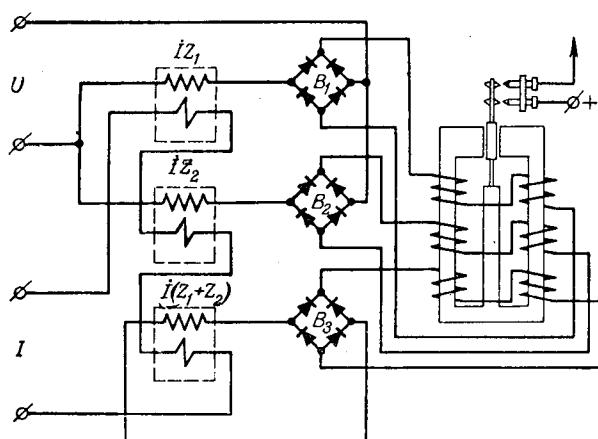


Рис. 3. Принципиальная схема дистанционного реле с эллиптической характеристикой.

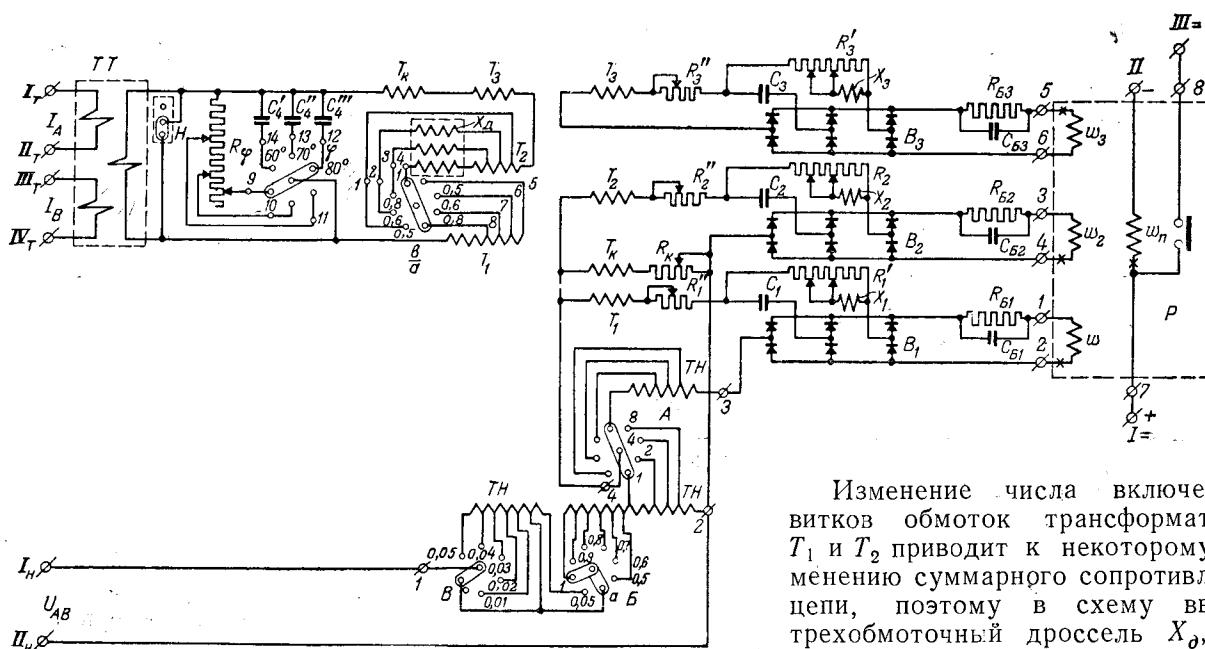


Рис. 5. Развернутая схема цепей дистанционного органа.

Перечисленные трудности усугубляются тем, что режимы длинных и сильно нагруженных линий, таких, например, как линия Куйбышевская гэс — Москва, испытывают значительные колебания. Напряжения на шинах подстанции отдельных участков этой линии при коротком замыкании в конце защищаемой зоны могут колебаться от 60 до 1,5 в. Это означает, что если мощность на зажимах реле в нормальном режиме принять за единицу, то мощность в минимальном режиме будет равна 0,000625. Обеспечить хорошую работу реле и выпрямителей в таких условиях весьма затруднительно.

После длительной расчетной и экспериментальной работы удалось преодолеть указанные трудности и получить дистанционное реле с эллиптическими характеристиками. Схема этого реле приведена на рис. 5.

Трансформатор  $TT$  подает в схему ток, пропорциональный разности фазных токов ( $I_A - I_B$ ) и уменьшенный для удобства выполнения регулирующих устройств в 4 раза.

Трансформаторы с воздушным зазором в магнитопроводе  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$  создают на идентичных вторичных обмотках э. д. с., пропорциональные  $(I_A - I_B) Z_1$ ;  $(I_A - I_B) Z_2$  и  $(I_A - I_B) (Z_1 + Z_2)$ . Первичные обмотки трансформаторов  $T_1$  и  $T_2$  выполнены с ответвлениями, позволяющими изменять величины  $Z_1$  и  $Z_2$ . Ответвления же подведены к коммутатору регулировки соотношения осей эллипса  $\frac{b}{a}$  так, что сумма включенных витков первичных обмоток трансформаторов  $T_1$  и  $T_2$  остается постоянной и равной числу витков первичной обмотки трансформатора  $T_3$ . Независимость уставки от эксцентризитета эллипса достигается тем, что при регулировке последнего число витков обмотки трансформатора  $T_3$  остается неизменным.

Изменение числа включенных витков обмоток трансформаторов  $T_1$  и  $T_2$  приводит к некоторому изменению суммарного сопротивления цепи, поэтому в схему введен трехобмоточный дроссель  $X_d$ , выравнивающий нагрузку.

Вторичные обмотки трансформаторов  $T_1$  и  $T_2$  включены последовательно с вторичными обмотками трансформатора напряжения  $TH$ , это позволяет получить необходимые разности:

$$U_{AB} = (I_A - I_B) Z_1 \text{ и } \dot{U}_{AB} = (I_A - I_B) Z_2.$$

Трансформаторы  $T_1$  и  $T_2$  имеют по одной обмотке, включененной в цепь тока, и по одной — в цепь напряжения. Каждая из этих обмоток имеет свой источник питания. Ток, протекающий в каждой из обмоток, наводит в других обмотках э. д. с. влияния. В нормальном режиме в основном следует считаться с влиянием цепей напряжения на цепь тока, так как э. д. с. влияния искажает величину первичного тока и смешает характеристики защиты. При отключении трансформаторов напряжения необходимо также считаться с тем, что э. д. с. наводятся и в цепях напряжения, что опасно для селективности других защит, присоединенных к тем же шинам трансформаторов напряжения.

Чтобы избежать взаимного влияния цепей тока и напряжения, в схему введен компенсирующий трансформатор  $T_k$  с воздушным зазором в магнитопроводе, создающий э. д. с., которая по величине равна э. д. с. влияния, обусловленным трансформаторами  $T_1$  и  $T_2$ , и направлена против них.

Благодаря воздушному зазору сопротивления первичных обмоток трансформаторов  $T_k$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$  мало зависят от тока, поэтому при неизменном положении коммутатора регулировки угла максимальной чувствительности нагрузка трансформатора тока  $TT$  практически постоянна и имеет преимущественно индуктивный характер. Это позволяет путем шунтирования трансформатора  $TT$  активно-емкостными сопротивлениями осуществлять поворот векторов токов, протекающих по обмоткам трансформаторов  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  и  $T_k$ , по отношению к вектору тока вторичной обмотки

трансформатора  $T_1$ . Шунтирующие активно-емкостные сопротивления подбираются так, чтобы ток в основной цепи изменялся только по фазе, а не по величине.

Коммутатор регулировки угла максимальной чувствительности  $\varphi$ , включая необходимые активные и емкостные сопротивления, позволяет направлять большую ось эллипса таким образом, чтобы угол между ней и осью активных сопротивлений был равен  $60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$  и  $90^\circ$ .

Таким образом, независимые регулировки угла максимальной чувствительности и соотношения осей эллипса осуществляются в токовых цепях схемы. Что же касается регулировки уставки, то она благодаря компенсации взаимного влияния цепей тока и напряжения является также независимой, но осуществляется в цепи напряжения коммутаторами  $A$ ,  $B$  и  $B'$ .

Коммутатор  $A$ , переключая витки вторичных обмоток трансформатора  $T_1$  и уменьшая этим их число в 2, 4 или 8 раз по сравнению с максимальными, осуществляет изменение диапазона уставок. Коммутатор  $B$ , осуществляя грубую, а коммутатор  $B'$  плавную регулировку уставки каждого диапазона, позволяют изменять ее от 0,5 до  $1,1 Z_{\text{нек}}$  с точностью до 1%. Величина уставки определяется по формуле

$$Z_y = Z_{\text{мин}} A(B + B'),$$

где  $A$ ,  $B$  и  $B'$  — коэффициенты, указанные против движков соответствующих коммутаторов.

В большинстве применяемых в настоящее время сложных защит промежуточные трансформаторы  $T_1$  выполняются с одной вторичной обмоткой. Это имеет место даже в том случае, когда вторичная обмотка питает несколько нагрузок, имеющих кроме нее другие источники питания. Входя в качестве одного из элементов в эти различные контуры, она оказывает на них некоторое влияние так же, как и они влияют на нее. Если этим влиянием в большинстве защищ, как правило, можно пренебречь, то этого нельзя сделать в рассматриваемой нами защите. При большой сплюснутости эллипса ( $\frac{b}{a} \approx 0,5$ ) э. д. с.,

наведенные в контурах, могут отличаться друг от друга во много раз. Может оказаться, что э. д. с. влияния в менее нагруженном контуре будет иметь величину того же порядка, что и действующая в нем э. д. с. от трансформатора  $T_2$ . Чтобы устранить взаимное влияние контуров, целесообразно трансформатор напряжения  $T_1$  выполнить с двумя отдельными вторичными обмотками.

Вторичные обмотки трансформаторов  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$  создают в контурах защиты необходимые э. д. с. и вместе с этим служат буферными реактивными сопротивлениями в цепи питания обмоток реле. Назначение этих буферных сопротивлений состоит в том, чтобы уменьшать в той степени, в какой это необходимо, нелинейность, вызываемую меняющимся в зависимости от тока сопротивлением выпрямителей. Кроме того, буфер-

ные сопротивления, складываясь с активно-емкостными сопротивлениями остальной части схемы питания обмоток, уменьшают нагрузку трансформатора напряжения  $T_1$  и придают ей практический активный характер.

Описанное устройство позволяет получить независимо регулируемые переменные напряжения:  $U_{AB} - (I_A - I_B)Z_1$ ,

$$U_{AB} - (I_A - I_B)Z_2 \text{ и } (I_A - I_B)(Z_1 + Z_2),$$

которые подаются на три отдельных устройства, служащих для расщепления и выпрямления переменных токов, пропорциональных этим напряжениям.

Выпрямители  $B_1$ ,  $B_2$  и  $B_3$  представляют собой три меднозакисных полумостика с одной шайбой в плече. Источник переменной э. д. с. включен между средней точкой первого полумостика и средней точкой делителя напряжения. Одно плечо делителя — активно-индуктивное, а другое — активно-емкостное. Делитель включен между средними точками второго и третьего полумостиков.

При соответствующем подборе сопротивлений токи, притекающие к средним точкам полумостиков, будут равны между собой, а их векторы будут сдвинуты относительно друг друга на  $120^\circ$ . Схема выпрямления соответствует шестифазной, поэтому выпрямленные токи будут содержать весьма незначительную переменную слагающую. Выпрямленные и слаженные токи подаются на обмотки поляризованного реле  $P$ .

С целью ускорения протекания переходных процессов последовательно с обмотками реле включены буферные активные сопротивления и емкости  $R_B$  и  $C_B$ . Для осуществления настройки схемы в контуры выпрямленных токов введены регулировочные реостаты  $R''$ .

В соответствии с описанной схемой выполнены и испытаны макеты дистанционных реле с эллиптическими характеристиками для линий 400 кв. В качестве чувствительного индикатора применены поляризованные реле, конструкция которых разработана релейной лабораторией Теплоэлектропроекта. Мощность срабатывания реле примерно 50 мквт.

Одноступенчатая защита с тремя подобными реле имеет следующие выходные параметры: 1) напряжение точной работы при минимальной уставке — 3 в; 2) ток точной работы —  $0,12 \dots 0,3 I_{\text{ном}}$ ; 3) потребление в цепях напряжения (максимальное) при минимальной уставке — 30 ва на фазу; 4) потребление в цепях тока — 25 ва на фазу; 5) время действия — при коротких замыканиях в пределах 0,1...0,9 защищаемой зоны и при токах короткого замыкания, больших  $0,3 I_{\text{ном}}$  — не более 1 или 2 периодов; 6) пределы регулирования уставки — 15...250 ом на фазу; 7) угол максимальной чувствительности —  $60 \dots 90^\circ$ ; 8) отношение малой оси эллипса к его большой оси — 0,5...1. Эти параметры получены на макете, имеющем  $U_{\text{ном}} = 100$  в и  $I_{\text{ном}} = 1$  а.

Величина минимальной уставки  $Z_{\min}$  выбирается, исходя из той минимальной длины линии, при которой возникает необходимость принятия специальных мер для отстройки от входных сопротивлений линий в нормальном режиме.

Анализ принципиальной схемы описанной защиты позволяет количественно оценить влияние отдельных факторов на основные параметры защиты. Введем следующие дополнительные обозначения:  $I_{cp}$  — ток срабатывания;  $I_{moc}$  — ток точной работы;  $Z_y$  — уставка реле сопротивления;  $Z_s$  — эквивалентное сопротивление схемы, равное отношению переменного напряжения на входе схемы к постоянному току в одной из обмоток реле, вызванному этим напряжением;  $U_{cp}$  — напряжение на схеме, при котором ток в поляризованном реле равен току его срабатывания  $I_{cp,n}$ .

Для случая металлического короткого замыкания на защищаемой линии все векторы, указанные в скобках выражения (1), коллинеарны и могут быть заменены своими модулями. Расстояния до фокусов эллипса  $Z_1$  и  $Z_2$  можно выразить через сопротивление уставки следующим образом:

$$z_1 = z_y \frac{1-\epsilon}{2}; \quad (3)$$

$$z_2 = z_y \frac{1+\epsilon}{2}. \quad (4)$$

Заменяя в выражении (1)  $U$  на  $Iz$  и  $z_1 + z_2$  на  $z_y$  и подставляя вместо  $z_1$  и  $z_2$  их значения из выражений (3) и (4), получаем:

$$\begin{aligned} M = k_1 I \left\{ z_y - \left[ z - \frac{z_y(1-\epsilon)}{2} \right] - \right. \\ \left. - \left[ z - \frac{z_y(1+\epsilon)}{2} \right] \right\} - M_{mex}. \end{aligned} \quad (5)$$

При рассмотрении выражения (5) следует различать три случая:

$$1) 0 < z < \frac{z_y(1-\epsilon)}{2}, \text{ тогда}$$

$$M = 2k_1 Iz - M_{mex}, \quad (5')$$

т. е. момент реле растет линейно по мере увеличения  $z$ , т. е. по мере перемещения точки короткого замыкания от начала координат до 1-го фокуса;

$$2) \frac{z_y(1-\epsilon)}{2} \leq z \leq \frac{z_y(1+\epsilon)}{2},$$

тогда

$$M = k_1 I z_y (1 - \epsilon) - M_{mex}, \quad (5'')$$

т. е. момент при перемещении точки короткого замыкания от первого фокуса до второго остается неизменным;

$$3) \frac{z_y(1+\epsilon)}{2} < z < Z_y,$$

тогда

$$M = k_1 I (z_y - z) - M_{mex}, \quad (5''')$$

т. е. при перемещении точки короткого замыкания от второго фокуса до конца зоны момента убывает линейно.

Таким образом, если точка короткого замыкания расположена между фокусами, момент будет максимальным, а ток срабатывания — минимальным.

При минимальном токе срабатывания  $I_{cp}$  реле находится на грани срабатывания ( $M = 0$ ) в зоне между фокусами. Поэтому на основании выражения (5) имеем:

$$k_1 I_{cp} z_y (1 - \epsilon) - M_{mex} = 0. \quad (6)$$

Для преодоления механического момента реле должен быть создан равный ему электрический момент, т. е. к реле должно быть подведено напряжение такой величины, чтобы ток реле был равен току его срабатывания

$$M = k_1 U_{cp} = k_1 I_{cp,n} z_s. \quad (7)$$

Из выражений (6) и (7) получим:

$$I_{cp} = \frac{I_{cp,n} z_\phi}{z_y (1 - \epsilon)}. \quad (8)$$

При токе точной работы реле должно действовать при  $z = 0,9z_y$ . Выражение (5) для этого случая приобретает следующий вид:

$$\begin{aligned} k_1 I_{cp,n} z_\phi = k_1 I_{moc} \left\{ z_y - \left[ 0,9z_y - z_y \frac{1-\epsilon}{2} \right] - \right. \\ \left. - \left[ 0,9z_y - z_y \frac{1+\epsilon}{2} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (9)$$

Из выражения (9) следует:

1. В случаях, когда  $\epsilon < 0,8$ , обе прямые скобки содержат положительные величины, и сумма модулей в выражении (9) может быть заменена модулем суммы. Произведя эту замену и необходимые вычисления, получим:

$$I_{moc} = \frac{5I_{cp,n} z_\phi}{z_y}, \quad (10)$$

т. е. при изменении эксцентризитета эллипса от нуля до 0,8 ток точной работы реле есть величина постоянная, равная в случае круговой характеристики пятикратному току срабатывания реле.

2. В случаях, когда  $\epsilon \geq 0,8$ , величина, содержащаяся во второй квадратной скобке, обращается в нуль или становится отрицательной, при этом сумма модулей может быть заменена арифметической суммой, в которой величины, стоящие во второй скобке, берутся с обратным знаком. Тогда

$$I_{cp,n} z_\phi = I_{moc} z_y (1 - \epsilon). \quad (11)$$

Следовательно

$$I_{moc} = \frac{I_{cp,n} z_\phi}{z_y (1 - \epsilon)}. \quad (12)$$

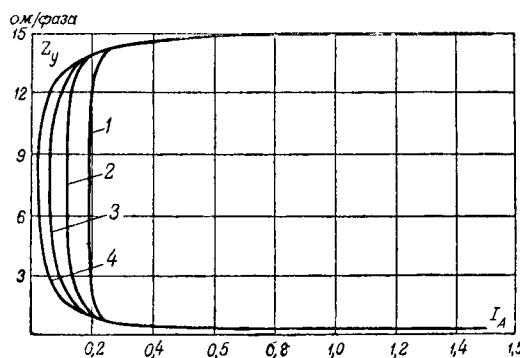


Рис. 6. Зависимость полного сопротивления срабатывания реле от тока и соотношения осей эллипса.

$$1 - \frac{b}{a} = 0,5; \quad 2 - \frac{b}{a} = 0,6; \quad 3 - \frac{b}{a} = 0,8; \quad 4 - \frac{b}{a} = 1.$$

Таким образом, если эллипс сплюснут до такой степени, что эксцентриситет  $\epsilon \leq 0,8$ , то ток срабатывания защиты умноживается, а ток точной работы остается постоянным. При дальнейшем увеличении степени сплюснутости величина тока точной работы становится равной току срабатывания, и обе эти величины продолжают одновременно возрастать пропорционально дроби  $\frac{1}{1-\epsilon}$ .

На рис. 6 приведена кривая зависимости сопротивления срабатывания реле от тока. Экспериментальные данные подтверждают приведенные аналитические соотношения.

**Выводы.** 1. Описанные детекторные дистанционные реле с эллиптической характеристикой дают широкие возможности отстройки защиты от входных сопротивлений линии в нормальном ре-

жиме и при качаниях, что делает весьма целесообразным их использование в качестве пусковых органов защит длинных, сильно нагруженных линий.

2. Выходные параметры этих реле (напряжение точной работы, потребление, время действия и т. д.) превосходят параметры дистанционных реле, выполненных на базе индукционных, электромагнитных и др.

3. Увеличение степени сплюснутости эллиптической характеристики имеет не только положительную, но и отрицательную сторону. Оно создает более благоприятные условия для отстройки реле от нормальных эксплуатационных режимов, но ведет к загрузлению реле, т. е. к увеличению влияния переходных сопротивлений в месте повреждения. Однако в случае длинных линий, на которых целесообразно применять описанные реле, влияние переходных сопротивлений как правило, значительно меньше, чем на коротких.

4. Ввиду того что схема реле несколько сложна, а опыт эксплуатации и наладки его отсутствует, необходимо более глубокое изучение свойств реле и накопление опыта эксплуатации. Выходные параметры реле могут быть существенно повышенны.

5. Отдельные узлы схемы реле пригодны не только для дистанционных защит, они могут быть успешно использованы в других защитах.

#### Литература

1. А. М. Федосеев. Релейная защита. Госэнергоиздат, 1952.
2. J. Landmarter H. Hoel. Un nouveau relais de distance de grande vitesse. Conférence Internationale des Grands Réseaux Électriques à Haute Tension. Session № 307, 1950.

{30.1.1951]



# Комплектные подстанции массового применения

Инж. А. А. ЕРМИЛОВ

Тяжпромэлектропроект

Освоив изготовление комплектных трансформаторных подстанций (КТП) для высотных зданий, Московский трансформаторный завод создал этим базу для дальнейшего развития производства этих подстанций и для широкого их внедрения в городские, сельские, промышленные, транспортные и другие электрические сети.

Комплектные распределительные подстанции, рассчитанные на широкое применение в народном хозяйстве, должны быть компактными, дешевыми, надежными и простыми в эксплуатации. Для них не должен требоваться постоянный оперативный ток, они не должны иметь сложной автоматики.

Исполнения КТП и их отдельных элементов должны быть максимально унифицированы, так как это облегчит производство подстанций и взаимозаменяемость элементов.

Сборных шин на стороне первичного напряжения КТП не должно быть; трансформаторы КТП должны работать раздельно. Это позволит значительно упростить схему электрических соединений, конструкцию и защиту подстанции, а также уменьшить токи короткого замыкания на стороне вторичного напряжения. Питание каждого трансформатора двухтрансформаторной КТП должно осуществляться от отдельной радиальной линии или магистрали.

Разрядники могут быть установлены на вводах вне КТП. Статические конденсаторы не должны входить в число элементов КТП, они могут быть установлены в соответствующих точках сети.

Для внутренней установки КТП должны изготавливаться как с масляными, так и с сухими

излагаются конкретные требования к комплектным трансформаторным подстанциям массового применения. Приводятся элементы схем электрических соединений КТП, даются варианты их комплектования, указываются области применения. Излагаются требования к электрооборудованию КТП, их конструктивному выполнению и защите, а также учету и измерению электроэнергии. Печатается в порядке обсуждения.

трансформаторами, а для наружной установки — только с масляными. Применение сухих трансформаторов в КТП для наружной установки нецелесообразно по техническим и экономическим соображениям.

Комплектные трансформаторные подстанции, рассчитанные на широкое применение, можно разделить на три группы. Данные, характеризующие каждую из групп, приведены в табл. 1.

Областями применения КТП, отнесенных к первой группе, в основном являются городские и сельские сети, а также небольшие промышленные предприятия, вспомогательные цехи крупных предприятий, строительства, карьеры и т. д.

КТП второй группы, первичное напряжение которых равно 6 или 10 кв, должны найти применение в основном в сетях промышленных предприятий, а КТП этой же группы с первичным напряжением 35 кв — в сельских электросетях и для электроснабжения отдельных промпредприятий в связи с внедрением глубоких вводов высокого напряжения. КТП 35 кв второй группы в первую очередь должны изготавляться для наружных установок; с целью ограничения числа исполнений вторичное напряжение их на первое время не следует принимать выше 0,525 кв.

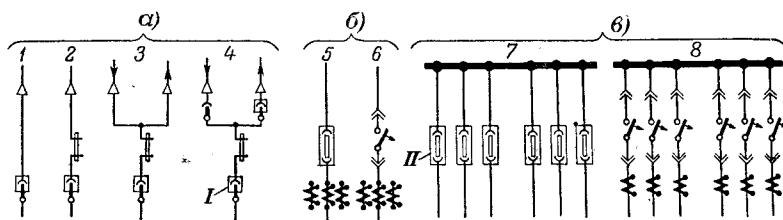
Наиболее мощными (1 800—5 600 ква) являются КТП третьей группы, их первичное напряжение 35 кв, а вторичное — 3; 6; 10 кв. Первичные напряжения ниже 35 кв и вторичные ниже 3 кв не предусматриваются, так как КТП этой группы с такими напряжениями не найдут сколько-нибудь значительного применения. КТП третьей группы найдут применение в сетях энергосистем, в коммунальных сетях, в качестве пунктов по приему электроэнергии от энергосистем

Таблица 1

	I группа	II группа	III группа
Мощность, ква . . . . .	100; 180; 320 (3); 6; 10	560; 750; 1 000 (3); 6; 10; 35	1 800; 3 200; 5 600 35 (3); 6; 10
Первичное напряжение, кв . . . . .	0,23; 0,4	0,23; 0,4; 0,525	
Вторичное напряжение, кв . . . . .	200	300 (до 10 кв) 500 (35 кв)	500
Предельная мощность короткого замыкания на стороне первичного напряжения, мгва	—	—	100 . . . 150
Предельная мощность короткого замыкания на стороне вторичного напряжения, мгва	—	—	Для наружной установки
Конструктивное выполнение . . . . .			

Рис. 1. Варианты элементов схем электрических соединений КТП первой группы.  
а — вводы высокого напряжения; б — присоединения трансформаторов на вторичном напряжении; в — сборные шины вторичного напряжения и присоединенные к ним линии.

I — выключатель нагрузки; II — комбинированный аппарат, состоящий из рубильника и предохранителя.



для предприятий средней величины, а также в качестве опорных пунктов сельской электрификации.

На рис. 1, 2 и 3 приведены наиболее употребительные элементы схем электрических соединений КТП всех трех групп применительно к двум основным схемам их питания: радиальной и магистральной.

На вводах высокого напряжения КТП первой группы применены выключатели нагрузки (или разъединители) и предохранители, заполненные кварцевым песком. На рис. 1 представлены четыре варианта этих вводов. Вариант 1 может быть применен при радиальном питании КТП с ближайшего пункта предприятия, на котором сосредоточена защита, а вариант 2 — при питании от удаленного постороннего источника. Поэтому в первом случае на вводе устанавливается только выключатель нагрузки или разъединитель, а во втором, кроме того, и предохранитель. Вариант 3 предназначается для случая магистрального питания неответственных потребителей или потребителей, имеющих резерв, поэтому для упрощения схемы КТП на входе и выходе магистрали никаких коммутационных аппаратов не предусматривается. Вариант 4 предназначается для случая магистрального питания более ответственных потребителей, когда требуется быстрое отключение поврежденного участка магистрали. При этом варианте вход магистрали может быть выполнен в виде глухого присоединения (без разъединителя), отключающие же аппараты (выключатель нагрузки или разъединитель) устанавливаются только на выходе магистрали.

В вариантах 3 и 4 на присоединении к трансформатору вместо выключателя нагрузки может быть применен разъединитель, который при этом устанавливается перед предохранителем ПК (по направлению потока мощности).

Присоединения трансформаторов со стороны низшего напряжения представлены двумя вариантами: вариантом 5 с комбинированным аппаратом, состоящим из рубильника и предохранителя, и вариантом 6 — с автоматом. Преимущественное применение найдет вариант 5, как более дешевый и обеспечивающий более высокую селективность

защиты при ныне существующих типах автоматов.

Линии низкого напряжения также представлены двумя вариантами: вариантом 7 с комбинированными аппаратами, состоящими из рубильников и предохранителей, и вариантом 8 — с автоматами.

На вводах высшего напряжения КТП второй группы наряду с выключателями нагрузки целесообразно иметь нормальные силовые выключатели небольшой мощности. На рис. 2 представлены три варианта этих вводов.

Варианты 1 и 3 предназначаются для случая применения магистральных схем питания и отличаются друг от друга аппаратурой присоединения трансформатора. Выключатель нагрузки (или разъединитель) может быть применен только на выходе магистрали, разъединитель же на входе магистрали может быть опущен, т. е. присоединение может быть выполнено глухим. Глухое присоединение на входе и на выходе магистрали также, как и для КТП первой группы, допустимо лишь в том случае, если потребители, питающиеся от КТП, не являются ответственными или же имеют резервное питание.

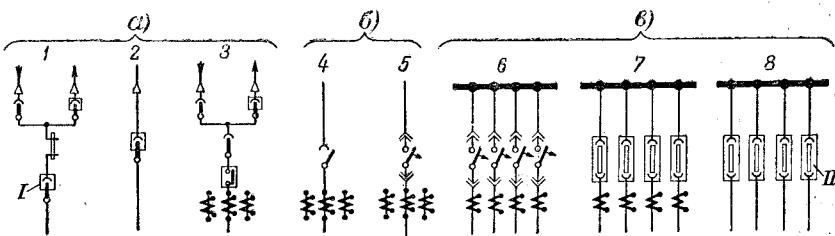
Вариант 2 применяется лишь при радиальном питании КТП от ближайшего пункта предприятия, на котором сосредоточена защита, поэтому на вводе в этом случае предусмотрен только выключатель нагрузки.

Присоединения трансформаторов со стороны низшего напряжения представлены двумя вариантами (4 и 5), а присоединения отходящих линий к сборным шинам низшего напряжения — тремя вариантами (6, 7 и 8). Вариант 5 присоединения трансформаторов и вариант 6 присоединения линий следует применять при автоматическом управлении трансформаторами или линиями низкого напряжения. Вариант 8 присоединения линий отличается от варианта 7 отсутствием измерительных трансформаторов тока и может быть применен при токе до 200 а и при отсутствии на линиях счетчиков.

На рис. 3 представлены три варианта вводов высшего напряжения (35 кв) для КТП третьей

Рис. 2. Варианты элементов схем электрических соединений КТП второй группы.  
а — вводы высокого напряжения; б — присоединения трансформаторов на вторичном напряжении; в — сборные шины вторичного напряжения и присоединенные к ним линии.

I — выключатель нагрузки; II — комбинированный аппарат, состоящий из рубильника и предохранителя.



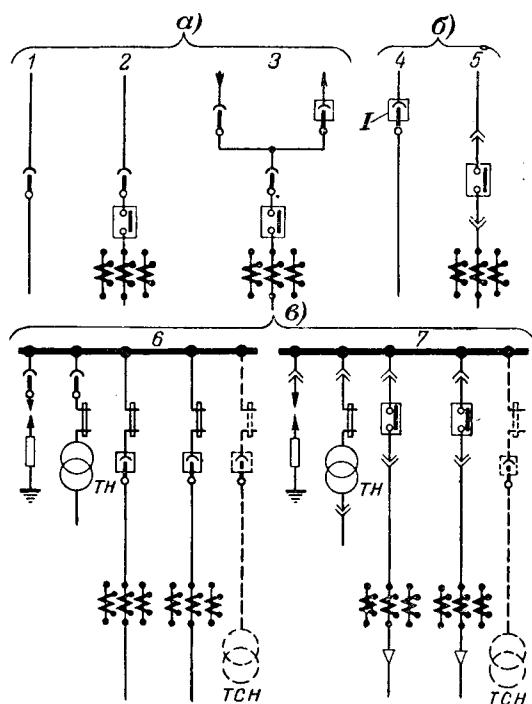


Рис. 3. Варианты элементов схем электрических соединений КТП третьей группы.

*a* — вводы высокого напряжения; *b* — присоединения трансформаторов на вторичном напряжении; *c* — сборные шины вторичного напряжения (3; 6; 10 кв) и присоединенные к ним линии и аппараты.  
— I — выключатель нагрузки.

группы. Варианты 1 и 2 применяются при радиальном питании КТП. Если расстояние от питающего пункта до КТП невелико, а мощность трансформатора не превышает 3 200 ква, применяется вариант 1. При значительной удаленности КТП от питающего пункта и любой мощности трансформатора применяется вариант 2. Вариант 3 применяется при магистральном питании КТП, причем для упрощения конструкции разъединитель может быть установлен только на выходе магистрали. В случае воздушной магистрали может быть допущена «глухая» отпайка (без разъединителей на входе и выходе). Трансформаторы тока на вводах, как правило, втулочные.

Присоединение трансформаторов КТП третьей группы к сборным шинам низшего напряжения представлено двумя вариантами: вариант 4 с выключателем нагрузки и вариант 5 с нормальным силовым выключателем.

Присоединение отходящих линий к сборным шинам 3; 6; 10 кв также представлено двумя вариантами: вариант 6 с выключателями нагрузки для КТП мощностью до 1 000 ква и вариант 7 с нормальными силовыми выключателями для КТП мощностью до 5 600 ква.

Предусмотрена возможность присоединения к сборным шинам 3; 6; 10 кв КТП трансформаторов собственных нужд мощностью 20...50 ква с вторичным напряжением 400/230 в. Необходимость их включения в число элементов КТП должна уточняться при заказе последней. В некоторых случаях питание собственных нужд КТП может быть достаточно надежно осуществлено

от цеховой сети низкого напряжения того предприятия, где эта КТП устанавливается.

Наиболее употребительные сочетания элементов, представленных на рис. 1, 2 и 3, при построении схем электрических соединений КТП даны в табл. 2.

Таблица 2

Группа	Наиболее употребительные сочетания элементов
I	1—5—7; 2—5—7; 4—5—7
II	1—5—6; 1—4—7; 1—4—6; 2—5—6; 2—4—7; 2—4—8; 1—4*; 2—5*
III	2—5—7; 2—4—6; 3—4—7; 1—5—7

\* Два последних сочетания второй группы применяются при схеме блока трансформатор-магистраль низкого напряжения. В этом случае согласно правилам устройства требуется защита от замыканий на землю на сторонах низкого напряжения, поэтому в нуле силового трансформатора предусматривается трансформатор тока.

**Задача, измерение и учет электроэнергии.** Вследствие разбросанности по территории предприятий, населенных пунктов и сельских районов, КТП, как правило, не будут иметь поблизости от себя посторонних надежных источников оперативного тока. Устраивать же такие источники, например, аккумуляторные батареи хотя бы даже напряжением 24...48 в только для КТП нецелесообразно в силу малой мощности последних. Поэтому при разработке защиты для КТП надо стремиться к простейшим решениям, не требующим постоянного оперативного тока.

Если КТП располагаются поблизости от питающего пункта, то их защита от перегрузок и коротких замыканий должна осуществляться, как правило, на питающем пункте. В этом случае на вводах к трансформаторам КТП устанавливаются лишь выключатели нагрузки или разъединители (рис. 1 и 2).

Там, где это возможно по параметрам сети и условиям селективности, для защиты КТП следует применять предохранители. Это позволит значительно упростить схему электрических соединений и конструкцию КТП. Предохранители могут быть применены для защиты трансформаторов КТП первой и частично второй группы.

Максимальная токовая защита КТП должна осуществляться с помощью надежных реле, встроенных в привод выключателя и снабженных выдержкой времени. Оперативные цепи этой защиты должны работать, как правило, на переменном токе. В случае выносных реле оперативные цепи должны питаться от промежуточных насыщающихся трансформаторов тока.

В случае необходимости автоматически перевести питание потребителя с вышедшего из работы трансформатора на соседний следует применять простейшую автоматику, не требующую оперативного постоянного тока. Для двухтрансформаторных КТП первой группы может быть использована, например, схема автоматики, предложенная Э. С. Иохвидовым и Г. В. Сербиновским [Л. 3].

При этой схеме (рис. 4) каждый из трансформаторов КТП работает раздельно на свою секцию

сборных шин. При исчезновении напряжения на зажимах одного из трансформаторов последний отключается контактором 1, вспомогательные контакты которого замыкают при этом цепь катушки контактора 2. Таким образом, питание обесточенной секции автоматически переводится на второй трансформатор.

Восстановление нормальной схемы питания после появления напряжения на зажимах отключенного трансформатора происходит также автоматически.

Механическая блокировка контакторов исключает возможность параллельной работы трансформаторов. Предохранитель 4 в цепи резервного питания срабатывает в том случае, когда при осуществлении резервирования трансформатор включается на короткое замыкание, имеющее место на резервируемой секции.

Схема рис. 4 надежно работает на многих сетевых подстанциях Московской кабельной сети. При контакторах типа КТ-35 на 600 а она пригодна для трансформаторов мощностью до 560 ква с вторичным напряжением 380 и 220 в. Мощность каждого трансформатора двухтрансформаторной КТП должна быть рассчитана, разумеется, на взаимное резервирование.

Учет электроэнергии и измерение электрических величин должны осуществляться со стороны вторичного напряжения КТП. Это не противоречит существующим правилам и позволяет в большинстве случаев обойтись без трансформаторов напряжения, а при отсутствии релейной защиты и без трансформаторов тока на первичном напряжении.

На всех КТП, присоединяемых непосредственно к сетям энергосистем, и в частности на КТП третьей группы, должна быть предусмотрена возможность установки счетчиков активной и реактивной энергии. В тех случаях, когда КТП непосредственной связи с сетями энергосистем не имеют и необходимость в коммерческом учете энергии отсутствует, устанавливать счетчики реактивной энергии не требуется. Это относится к значительному числу КТП первой и второй групп, в частности к цеховым КТП промпредприятий и некоторым коммунальным КТП.

Возможность учета энергии должна быть предусмотрена также, как правило, на линиях 3; 6; 10 кв КТП третьей группы. В тех случаях, когда линии напряжением до 0,525 кв КТП первой и второй групп питают потребителей, относящихся к различным хозрасчетным единицам, возможность учета электроэнергии следует предусматривать и на них.

Амперметры должны устанавливаться на стороне вторичного напряжения трансформаторов всех КТП, на всех линиях 3; 6; 10 кв, отходящих от сборных шин КТП третьей группы, и на крупных линиях напряжением до 0,525 кв, отходящих от сборных шин КТП второй и первой групп, в тех случаях, когда это необходимо, по условиям эксплуатации.

На сборных шинах должны предусматриваться вольтметры, которые при напряжении до 0,525 кв присоединяются непосредственно к ши-

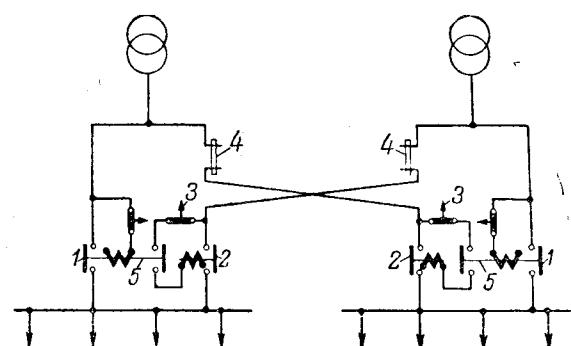


Рис. 4. Схема автоматики двухтрансформаторной КТП на переменном оперативном токе.

1 — контактор основного питания; 2 — контактор резервного питания; 3 — установочный однополюсный автомат защиты катушки контактора; 4 — предохранитель защиты шин секции; 5 — вспомогательные контакты контактора основного питания.

нам, а при напряжениях 3; 6; 10 кв — через трансформаторы напряжения. При изолированной нейтрали трансформатора на сборных шинах вторичного напряжения следует предусматривать контроль изоляции с помощью трех вольтметров.

Количество устанавливаемых измерительных приборов и счетчиков должно уточняться при заказе КТП.

**Конструктивное выполнение КТП.** КТП должна состоять из следующих элементов: камеры ввода первичного напряжения, силового трансформатора, распредел устройства вторичного напряжения. При сухих трансформаторах эти элементы следует заключать в шкафы, комплектуемые в одно целое. При масляных трансформаторах шинные соединения между трансформатором и камерой ввода первичного напряжения, а также между трансформатором и распределительным устройством или шинной магистралью низкого напряжения должны заключаться в защитные коробы. При схеме блока трансформатор — магистраль коммутационные аппараты выводов от трансформатора к магистрали должны быть размещены в шкафу или ящике.

Камеры вводов первичного напряжения целесообразно выполнять стационарными в виде шкафа или ящика без устройства для выкатки силового выключателя. При разбросанности и удаленности малых КТП от ремонтных пунктов и при наличии на них одной лишь камеры выкатка выключателя не дает никаких преимуществ. При простых схемах ящик ввода укрепляется непосредственно на трансформаторе.

Распределительное устройство вторичного напряжения должно быть комплектным и иметь одну систему шин, которая при двух трансформаторах разделяется на две секции. При напряжениях 3; 6 и 10 кв может быть применено как стационарное распределустройство типа КСО (при небольшом числе камер), так и выкатное с выключателями на тележках [Л. 2]. Для небольших КТП первой и частично второй группы с вторичным напряжением 0,23; 0,4 и 0,525 кв могут быть применены комплектные распределустройства с рубильниками и встроенными в них предохранителями или с установочными автоматами на отхо-

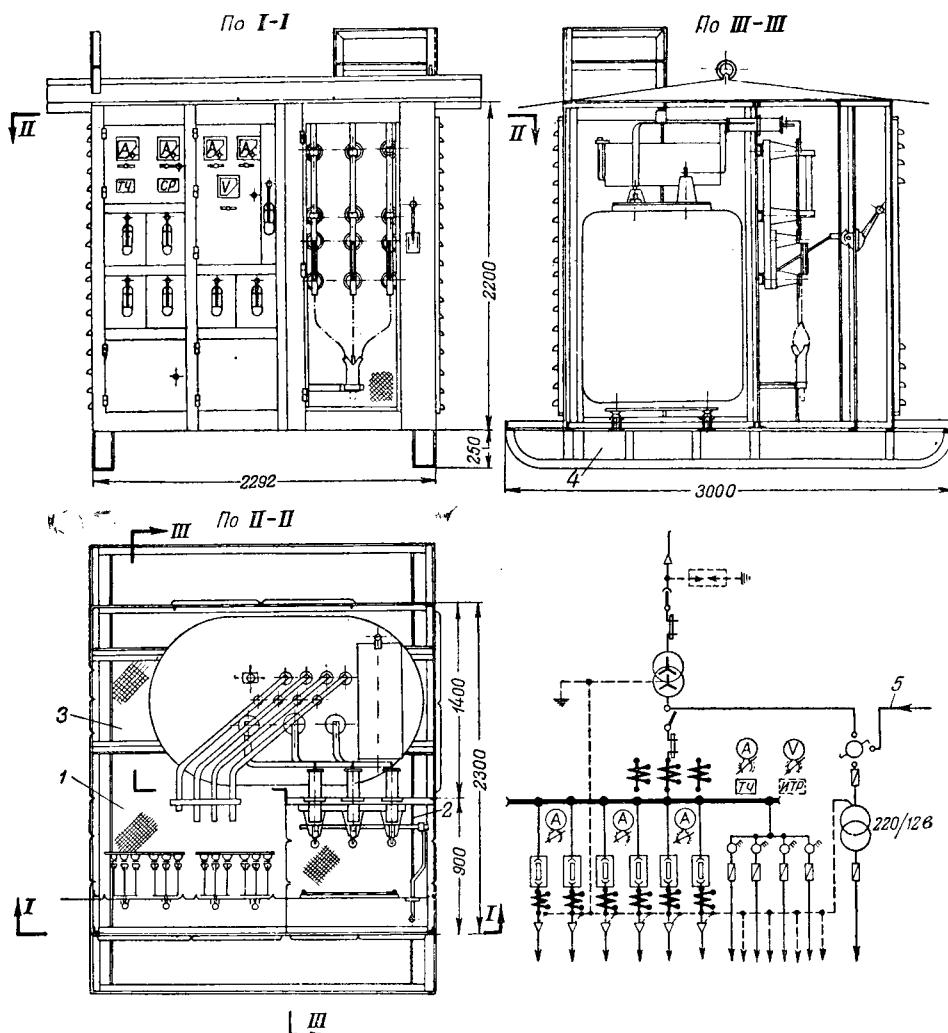


Рис. 5. Комплектная трансформаторная подстанция мощностью 180 или 320 ква, напряжением до 10 кв для наружной установки с кабельным вводом.

1 — камера распредустройства низкого напряжения; 2 — камера высокого напряжения; 3 — камера силового трансформатора; 4—салазки; 5—ввод аварийного питания.

дящих линиях и с рубильниками или универсальными автоматами на присоединениях трансформаторов, а для крупных КТП второй группы — с усовершенствованными универсальными автоматами.

Должна быть предусмотрена возможность одностороннего обслуживания КТП и установки ее в помещении без дополнительных ограждений, должен быть обеспечен доступ к оборудованию и токоведущим частям всех элементов первичного и вторичного напряжения. Все съемные части ограждений и дверцы должны иметь механические запоры, допускающие запирание без ключа. Все токоведущие части должны иметь сплошные покрытия. Включение и отключение автоматических выключателей и рубильников должно производиться при закрытых дверцах, которые могут открываться только при отключенных аппаратах.

В целях унификации камеры вводов КТП должны быть рассчитаны на две кабельные воронки или муфты. Ввод и вывод кабелей, проводов и шин должен осуществляться как сверху, так и снизу камер. КТП для наружной установки

должны быть рассчитаны на непосредственное присоединение к воздушным линиям.

Две секции комплектного распредустройства двухтрансформаторных КТП располагаются между трансформаторами. Такое расположение позволяет соединить их непосредственно автоматическими выключателями или рубильниками и дает возможность не применять кабельной перемычки. Это должно быть учтено при изготовлении трансформаторов путем соответствующего расположения маслоуказателей, термометров, пробок, кранов и т. п.

Должна быть предусмотрена необходимая вентиляция соответствующих элементов КТП. Контактные соединения должны обладать высокой надежностью, быть надлежащим образом обработанными и иметь антикоррозийное покрытие.

Все приборы защиты, измерения, учета, управления и сигнализации должны размещаться на лицевой стороне КТП. В вводных камерах первичного напряжения должны быть предусмотрены места для наложения закороток при ревизиях и ремонтах.

Проводка вторичной коммутации должна быть выполнена и присоединена к приборам, зажимам и т. п. таким образом, чтобы обеспечивалась возможность контроля или замены любого поврежденного провода. Должна быть обеспечена возможность снимать приборы без демонтажа проводки.

На рис. 5 представлена схема электрических соединений и конструкция передвижной КТП мощностью 180 или 320 ква, напряжением до 10 кв, для наружной установки, с кабельными вводами высокого напряжения, заимствованная из унифицированной серии, разработанной в Тяжпромэлектропроекте<sup>1</sup>. Эта КТП относится к первой группе. Вентиляционные жалюзи предусмотрены в дверях и стенах КТП. При отсутствии необходимости в частых перемещениях КТП может быть снята с салазок и установлена на фундаменте.

**Электрооборудование КТП.** Применяемое для КТП электрооборудование должно быть таким, чтобы можно было получить наиболее рациональные конструкции отдельных элементов и наибольшую компактность всей установки, оно должно быть простым в обслуживании и не должно требовать сложных вспомогательных устройств для производства операций.

Выводы масляных трансформаторов должны быть расположены в боковой части трансформатора, а не сверху. Это будет способствовать более удобному соединению трансформаторов с расположенными рядом высоковольтными шкафами и низковольтным распределительным устройством. Для того чтобы ширина КТП была минимальной, желательно располагать выводы с узких сторон масляного трансформатора.

В КТП для внутренней установки целесообразно применять силовые выключатели высокого напряжения безмасляные или с малым объемом масла, а в КТП для наружной установки — с большим объемом масла (баковые). При напряжении до 10 кв из существующих типов выключателей наиболее пригодны ВМГ-133 для внутренней установки и ВМБ-10 для наружной установки. При напряжении 35 кв для наружной установки наиболее пригоден баковый выключатель типа ВМ-35. Основным типом привода должен явиться автоматический привод ручного управления.

Кроме силовых выключателей для КТП следует применять выключатели нагрузки в тех случаях, когда их параметры соответствуют нормальнym режимам и режимам короткого замыкания

сети. Применение выключателей нагрузки рекомендовано Техническим управлением МЭС. Однако эти рекомендации подлежат уточнению после того, как будут закончены испытания выключателей нагрузки на заводе «Электроаппарат».

Чтобы КТП не получались чрезмерно громоздкими, применяемые на них рубильники, как правило, должны иметь встроенные в них предохранители. Такие комбинированные аппараты применяются на подстанциях, изготавляемых электромонтажными организациями Министерства строительства. Для улучшения условий гашения дуги должны применяться предохранители с кварцевым заполнением.

Автоматы должны быть взаимозаменяемыми. Универсальные автоматы должны иметь ручное и дистанционное управление на переменном оперативном токе. Должна быть предусмотрена трехфазная, максимальная, зависимая от тока защита, а также минимальная защита с регулируемой выдержкой времени. Для выемки из ячеек и транспортировки тяжелых универсальных автоматов должны поставляться специальные тележки. Установочные автоматы должны иметь ручное управление и быть снабжены максимальной перегрузочной защитой.

Выпускаемые ныне универсальные автоматы серии А-2000 не приспособлены для комплектных распредустройств. Должна быть разработана новая серия этих автоматов, приспособленных для комплектных распредустройств и имеющих параметры, отвечающие перечисленным выше требованиям. Для КТП могут быть использованы модификации автоматов А-2000, изготавливаемые заводами Министерства электротехнической промышленности для комплектных подстанций высотных зданий, с внесением в них некоторых усовершенствований.

Должны быть разработаны компактные трансформаторы тока на напряжение до 500 в и ток до 1 500 а и кабельные муфты для наружной установки на напряжение до 10 кв с фарфоровыми изоляторами.

#### Литература

1. А. А. Ермилов. Основные принципы построения трансформаторных подстанций промпредприятий. Электричество, № 1, 1950.
2. А. А. Ермилов. Комплектные распределительные устройства для промпредприятий. Электричество, № 3, 1952.
3. Э. С. Иохвидов и Г. В. Сербиновский. Опыт применения комплектных трансформаторных подстанций Московского трансформаторного завода. Электрические станции, № 8, 1953.

[21. 12. 1953]

<sup>1</sup> Разработана А. Б. Диринским и др.



# О выборе системы координат при расчете переходных процессов в цепях с синхронными машинами

Кандидат техн. наук, доц. С. В. СТРАХОВ

**Введение.** В СССР проводятся большие работы по автоматизации энергосистем. Обычно генераторы имеют регуляторы напряжения, а турбины — регуляторы скорости, и эти автоматические регуляторы оказывают определенное влияние на протекание динамических процессов в энергосистемах.

Под динамическими процессами в энергосистеме мы понимаем переходные электромеханические процессы в системе нескольких синхронных машин и статических нагрузок, связанных линиями передачи (рис. 1), которые могут возникать, например, при внезапном прекращении доступа пара или воды в турбину любой из машин, внезапной потере возбуждения любой из машин, включении и отключении нагрузок или линий, связывающих генераторы, при приближенной синхронизации (самосинхронизации) генераторов и т. п. Возникающие при этом электромагнитные и механические переходные процессы, сопровож-

дано сравнение возможных способов выбора вращающихся координатных осей и предложен наиболее рациональный метод их выбора для расчета переходных электромеханических процессов в электрических системах. На конкретном примере системы, состоящей из трех синхронных машин без успокоительных обмоток, при переменных скоростях вращения их генераторов, трех линий передачи и трех статических нагрузок, дан метод вывода и непосредственной записи дифференциальных уравнений переходных электромеханических процессов.

дающиеся изменением во времени скоростей роторов машин, приводят к возникновению в системе качаний генераторов или режима неустановившегося асинхронного хода.

Поэтому в принципе расчет переходных электромеханических процес-

сов в электрических системах следует вести с учетом той или иной принятой системы регулирования напряжения и скорости. Для этого предварительно должны быть хорошо изучены переходные электромеханические процессы в самих машинах и их системах при отсутствии автоматических регуляторов напряжения и скорости. Поэтому, в качестве первого этапа, в настоящей работе влияние системы регулирования не учитывается.

**Сравнение способов выбора вращающихся систем координат.** Целью данной работы является обоснование наиболее рационального выбора системы координат для получения простейших дифференциальных уравнений электромеханических переходных процессов и последующего их решения каким-либо методом, удобным для решения системы нелинейных уравнений. Возможен ряд способов выбора системы координат. Рассмотрим и сравним их.

1. Можно выбрать систему координат неподвижной и, следовательно, связанной со статорами синхронных машин. Тогда уравнения каждой синхронной и асинхронной машины будут содержать периодические коэффициенты, и решать их будет весьма трудно.

2. Можно отнести уравнения всех машин, линий и нагрузок к какой-нибудь одной системе осей, вращающейся с постоянной, например, с синхронной

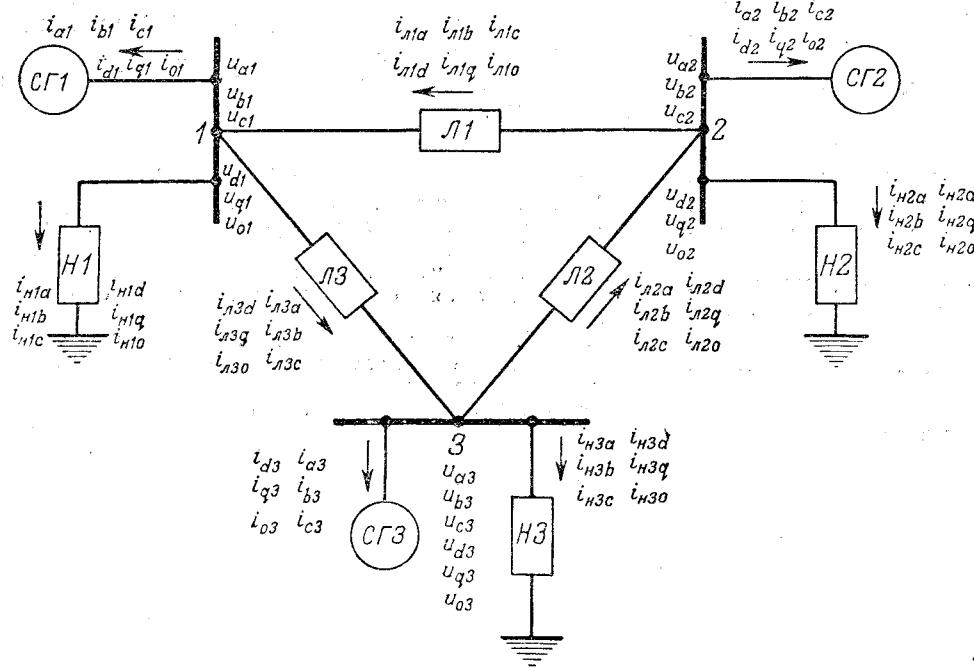


Рис. 1.

скоростью. Это предложение было сделано А. А. Горевым [Л. 1] для случая питания линии от одного генератора и применено М. В. Мееровым к системе из двух синхронных машин. Как известно из теории преобразования уравнений синхронных машин, при этом также не удается избавиться от периодических коэффициентов в уравнениях машин.

3. Можно отнести уравнения всей системы к вращающимся осям, жестко связанным, например, с ротором одной из синхронных машин. При этом предполагается, что ротор каждой из синхронных машин вращается с переменной угловой скоростью, меняющейся во времени по определенному закону. Тогда упростятся уравнения именно той из синхронных машин, с ротором которой были жестко связаны выбранные координатные оси. Но из уравнений всех остальных синхронных машин периодические коэффициенты исключить не удается. Разумеется, при этом усложняются уравнения неподвижных в пространстве элементов сети, т. е. линий электропередачи и статических нагрузок, так как процессы в них рассматриваются с точки зрения наблюдателя, связанного с системой координатных осей, вращающейся с переменной угловой скоростью. Очевидно, что в уравнениях линий передачи и статических нагрузок появятся, кроме э. д. с. трансформации, еще и э. д. с. вращения, определяемые произведением потокосцепления на производную по времени от переменного угла между соответствующими осями, и соответствующие уравнения станут нелинейными. Впрочем ясно, что уравнения неподвижных в пространстве элементов сети будут проще всего при отнесении их именно к неподвижной в пространстве системе осей и всегда усложняются при отнесении их к системе осей, вращающихся с постоянной и тем более с переменной скоростью.

4. Стремясь к максимальному упрощению уравнений каждой из синхронных машин, можно отнести уравнения каждой из этих машин к осям, жестко связанным с ее ротором; тогда периодические коэффициенты исчезнут из уравнений всех синхронных машин. Вместе с тем уравнения асинхронных машин, линий передачи, статических нагрузок и уравнения первого закона Кирхгофа во всех точках разветвления схемы можно отнести к системе координатных осей, жестко связанных с ротором одной из синхронных машин, причем выбор этой синхронной машины определяется схемой коммутации системы.

Рассматривая две синхронные машины, работающие на общие шины [Л. 2]. Парк так записывал их уравнения во вращающихся координатах, что с точки зрения вопроса о рациональном выборе вращающихся координатных осей, поставленного автором [Л. 3], из этой записи можно сделать вывод, что Парк относил уравнения каждой из машин к осям, связанным с ее ротором. Это положение было применено автором к системе из двух синхронных машин, связанных линией передачи, и было показано, что уравнения линии можно отнести к осям, связанным с ротором как первой, так и второй синхронной машины [Л. 3].

5. Наконец, можно, как предложил А. А. Воронов, записывать уравнения синхронных машин, как указано в п. 4, а уравнения линий передачи и статических нагрузок согласно п. 2 относить к синхронным осям.

Покажем предлагаемый нами метод составления уравнений, изложенный в п. 4, применительно к схеме рис. 1.

#### Предлагаемый метод составления уравнений.

Уравнения каждой из синхронных машин без успокоительных обмоток относим к ее собственным осям. Для первого синхронного генератора получаем [Л. 4]:

$$u_{d1} = i_{d1} r_1 + \frac{d}{dt} (L_{d1} i_{d1} + M_{q1} i_{q1}) - L_{q1} i_{q1} \frac{d\theta_1}{dt}; \quad (1)$$

$$u_{q1} = i_{q1} r_1 + L_{q1} \frac{di_{q1}}{dt} + (L_{d1} i_{d1} + M_{q1} i_{q1}) \frac{d\theta_1}{dt}; \quad (2)$$

$$u_{t1} = i_{t1} r_1 + \frac{d}{dt} \left( L_{t1} i_{t1} + \frac{3}{2} M_{t1} i_{d1} \right); \quad (3)$$

$$J_1 \frac{d^2\theta_1}{dt^2} + \frac{3}{2} [i_{d1} i_{q1} (L_{d1} - L_{q1}) + i_{t1} i_{q1} M_{t1}] = M_1. \quad (4)$$

В уравнениях имеется шесть неизвестных функций:  $u_{d1}$ ,  $u_{q1}$ ,  $i_{d1}$ ,  $i_{q1}$ ,  $i_{t1}$ ,  $\theta_1$ . Аналогично, заменяя индекс 1 индексами 2 и 3, записывают уравнения для второго и третьего синхронных генераторов. Сбознения всех величин показаны на рис. 1 и 2 и совпадают с принятыми в [Л. 3 и 4].

Каждый синхронный генератор, не работающий на общие шины с другим, дает четыре уравнения с шестью неизвестными. Итого для трех генераторов имеем 12 уравнений с 18 неизвестными. Так как повреждений, приводящих к возникновению составляющих нулевой последовательности, мы не рассматриваем, то уравнений для составляющих нулевой последовательности, как правило, приводить не будем.

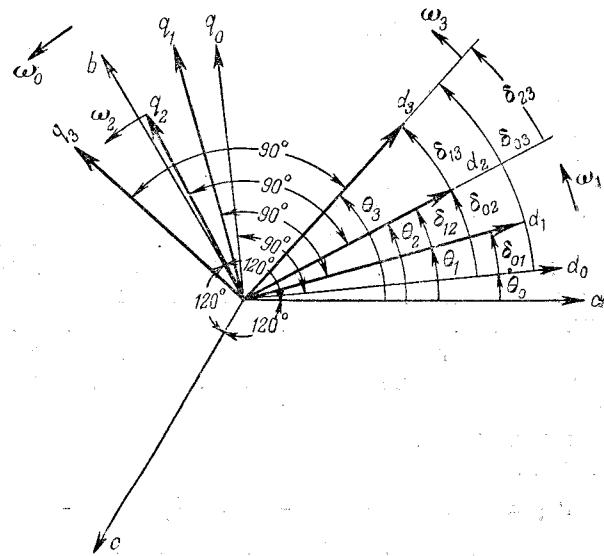


Рис. 2.

Углы  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  и  $\theta_3$  между продольными осями машин и неподвижной осью фазы  $a$  статора видны на рис. 2 и определяются равенствами

$$\left. \begin{aligned} \theta_1 &= \int_0^t \omega_1 dt + \theta_{1o}, \quad \frac{d\theta_1}{dt} = \omega_1; \\ \theta_2 &= \int_0^t \omega_2 dt + \theta_{2o}, \quad \frac{d\theta_2}{dt} = \omega_2; \\ \theta_3 &= \int_0^t \omega_3 dt + \theta_{3o}, \quad \frac{d\theta_3}{dt} = \omega_3; \\ \theta_0 &= \int_0^t \omega_0 dt + \theta_{0o} = \omega_0 t + \theta_{0o}, \\ \frac{d\theta_0}{dt} &= \omega_0 = \text{пост}; \\ \delta_{12} &= \theta_2 - \theta_1, \quad \delta_{13} = \theta_3 - \theta_1, \\ \delta_{23} &= \theta_3 - \theta_2; \\ \delta_{01} &= \theta_1 - \theta_0, \quad \delta_{02} = \theta_2 - \theta_0, \\ \delta_{03} &= \theta_3 - \theta_0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Уравнения линий и статических нагрузок будем относить к вращающимся осям, жестко связанным с ротором первого синхронного генератора. Тогда наиболее общими будут уравнения второй линии, не примыкающей ни началом, ни концом к шинам первого генератора:

$$\begin{aligned} u_{d2} \cos(\theta_2 - \theta_1) - u_{q2} \sin(\theta_2 - \theta_1) &= \\ = u_{d3} \cos(\theta_3 - \theta_1) - u_{q3} \sin(\theta_3 - \theta_1) - r_{\alpha2} i_{\alpha2d} - & \\ - L_{\alpha2p} \frac{di_{\alpha2d}}{dt} + L_{\alpha2p} i_{\alpha2q} \frac{d\theta_1}{dt}; & \quad (6) \\ u_{q2} \cos(\theta_2 - \theta_1) + u_{d2} \sin(\theta_2 - \theta_1) &= \\ = u_{q3} \cos(\theta_3 - \theta_1) + u_{d3} \sin(\theta_3 - \theta_1) - & \\ - r_{\alpha2} i_{\alpha2q} - L_{\alpha2p} \frac{di_{\alpha2q}}{dt} - L_{\alpha2p} i_{\alpha2d} \frac{d\theta_1}{dt}. & \quad (7) \end{aligned}$$

В этих уравнениях, вывод которых дан в приложении 1, имеем две новые неизвестные функции:  $i_{\alpha2d}$  и  $i_{\alpha2q}$ .

Уравнения линий  $L1$  и  $L3$ , отнесенные также к осям, жестко связанным с ротором первого генератора, получим из уравнений (6) и (7) линии  $L2$  по правилу кругового замещения индексов. Замене не подлежит только индекс у  $\theta_1$ , стоящего под аргументами  $\sin$  и  $\cos$  и под знаком производной по времени. При этом, поскольку линия  $L1$  примыкает своим концом (смотря по направлению тока), к точке 1 (шины первого генератора), а линия  $L3$ —своим началом к той же точке, то уравнения их будут проще, чем уравнения линии  $L2$ .

Линия  $L1$ :

$$\begin{aligned} u_{d1} &= u_{d2} \cos(\theta_2 - \theta_1) - u_{q2} \sin(\theta_2 - \theta_1) - \\ &- r_{\alpha1} i_{\alpha1d} - L_{\alpha1p} \frac{di_{\alpha1d}}{dt} + L_{\alpha1p} i_{\alpha1q} \frac{d\theta_1}{dt}; \quad (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_{q1} &= u_{q2} \cos(\theta_2 - \theta_1) + u_{d2} \sin(\theta_2 - \theta_1) - \\ &- r_{\alpha1} i_{\alpha1q} - L_{\alpha1p} \frac{di_{\alpha1q}}{dt} - L_{\alpha1p} i_{\alpha1d} \frac{d\theta_1}{dt}. \quad (9) \end{aligned}$$

В этих уравнениях имеем две новые неизвестные функции:  $i_{\alpha1d}$  и  $i_{\alpha1q}$ .

Линия  $L3$ :

$$\begin{aligned} u_{d3} \cos(\theta_3 - \theta_1) - u_{q3} \sin(\theta_3 - \theta_1) &= \\ = u_{d1} - r_{\alpha3} i_{\alpha3d} - L_{\alpha3p} \frac{di_{\alpha3d}}{dt} + L_{\alpha3p} i_{\alpha3q} \frac{d\theta_1}{dt}; & \quad (10) \\ u_{q3} \cos(\theta_3 - \theta_1) + u_{d3} \sin(\theta_3 - \theta_1) &= \\ = u_{q1} - r_{\alpha3} i_{\alpha3q} - L_{\alpha3p} \frac{di_{\alpha3q}}{dt} - & \\ - L_{\alpha3p} i_{\alpha3d} \frac{d\theta_1}{dt}. & \quad (11) \end{aligned}$$

В этих уравнениях также имеем две новые неизвестные функции:  $i_{\alpha3d}$  и  $i_{\alpha3q}$ . Итак, три линии дают шесть уравнений с шестью новыми неизвестными функциями.

Уравнения статической нагрузки  $H2$ , включенной на шины второго генератора, будут (приложение 2):

$$0 = u_{d2} \cos(\theta_2 - \theta_1) - u_{q2} \sin(\theta_2 - \theta_1) - \\ - r_{\alpha2} i_{\alpha2d} - L_{\alpha2p} \frac{di_{\alpha2d}}{dt} + L_{\alpha2p} i_{\alpha2q} \frac{d\theta_1}{dt}; \quad (12)$$

$$0 = u_{q2} \cos(\theta_2 - \theta_1) + u_{d2} \sin(\theta_2 - \theta_1) - \\ - r_{\alpha2} i_{\alpha2q} - L_{\alpha2p} \frac{di_{\alpha2q}}{dt} - L_{\alpha2p} i_{\alpha2d} \frac{d\theta_1}{dt}. \quad (13)$$

В этих уравнениях имеем две новые неизвестные функции:  $i_{\alpha2d}$  и  $i_{\alpha2q}$ .

По правилу кругового замещения индексов с учетом замечания об индексе  $\theta_1$ , сделанного выше, получим уравнения для нагрузок  $H3$  и  $H1$ , причем для  $H1$  уравнения будут проще, ибо нагрузка включена на шины первого генератора.

Нагрузка  $H3$ :

$$0 = u_{d3} \cos(\theta_3 - \theta_1) - u_{q3} \sin(\theta_3 - \theta_1) - \\ - r_{\alpha3} i_{\alpha3d} - L_{\alpha3p} \frac{di_{\alpha3d}}{dt} + L_{\alpha3p} i_{\alpha3q} \frac{d\theta_1}{dt}; \quad (14)$$

$$0 = u_{q3} \cos(\theta_3 - \theta_1) + u_{d3} \sin(\theta_3 - \theta_1) - \\ - r_{\alpha3} i_{\alpha3q} - L_{\alpha3p} \frac{di_{\alpha3q}}{dt} - L_{\alpha3p} i_{\alpha3d} \frac{d\theta_1}{dt}. \quad (15)$$

В этих уравнениях имеем две новые неизвестные функции  $i_{\alpha3d}$  и  $i_{\alpha3q}$ .

Нагрузка  $H1$ :

$$0 = u_{d1} - r_{\alpha1} i_{\alpha1d} - L_{\alpha1p} \frac{di_{\alpha1d}}{dt} + \\ + L_{\alpha1p} i_{\alpha1q} \frac{d\theta_1}{dt}; \quad (16)$$

$$0 = u_{q1} - r_{\alpha1} i_{\alpha1q} - L_{\alpha1p} \frac{di_{\alpha1q}}{dt} - \\ - L_{\alpha1p} i_{\alpha1d} \frac{d\theta_1}{dt}. \quad (17)$$

В этих уравнениях также имеем две новые неизвестные функции  $i_{\alpha1d}$  и  $i_{\alpha1q}$ . Таким образом, три нагрузки дают шесть уравнений с шестью новыми неизвестными функциями.

Уравнения 1-го закона Кирхгофа для узла 2, вывод которых дан в приложении 3, будут:

$$i_{\alpha 1d} + i_{d2} \cos(\theta_2 - \theta_1) - i_{q2} \sin(\theta_2 - \theta_1) + i_{\alpha 2d} - i_{\alpha 2d} = 0; \quad (18)$$

$$i_{\alpha 1q} + i_{q2} \cos(\theta_2 - \theta_1) + i_{d2} \sin(\theta_2 - \theta_1) + i_{\alpha 2q} - i_{\alpha 2q} = 0. \quad (19)$$

По правилу кругового замещения индексов с учетом замечания об индексе  $\theta_1$  (см. выше) получим уравнения для узлов 3 и 1; для узла 1 уравнения будут проще, ибо он совпадает с зажимами первого генератора:

узел 3:

$$i_{\alpha 2d} + i_{d3} \cos(\theta_3 - \theta_1) - i_{q3} \sin(\theta_3 - \theta_1) + i_{\alpha 3d} - i_{\alpha 3d} = 0; \quad (20)$$

$$i_{\alpha 2q} + i_{q3} \cos(\theta_3 - \theta_1) + i_{d3} \sin(\theta_3 - \theta_1) + i_{\alpha 3q} - i_{\alpha 3q} = 0; \quad (21)$$

узел 1:

$$i_{d1} - i_{\alpha 1d} + i_{\alpha 1d} + i_{\alpha 3d} = 0; \quad (22)$$

$$i_{q1} - i_{\alpha 1q} + i_{\alpha 1q} + i_{\alpha 3q} = 0. \quad (23)$$

Последние шесть уравнений новых неизвестных не содержат. Таким образом, для схемы рис. 1, достаточно сложной по структуре, получаем 30 уравнений с 30 неизвестными. Разумеется, ряд неизвестных функций легко исключить из этой системы. Например, с помощью уравнений (18)...(23) весьма легко исключить из всех других уравнений составляющие токов  $i_{\alpha 1d}$ ,  $i_{\alpha 1q}$  или  $i_{\alpha 2d}$ ,  $i_{\alpha 2q}$  и т. д. Из уравнений (16) и (17) или (1) и (2) легко исключить  $u_{d1}$  и  $u_{q1}$  и т. д. Таким образом, возможны значительные упрощения, которые необходимо выполнить при решении системы. Систему можно решать с помощью интегратора или одним из численных методов решения системы нелинейных дифференциальных уравнений, что, конечно, труднее.

Изложенный метод получения уравнений позволяет применить его к системе с любым числом синхронных машин, линий и статических нагрузок.

**Сравнение возможных методов записи уравнений линий электропередачи и статических нагрузок.** Сравним изложенные выше четвертый и пятый методы выбора вращающихся координатных осей. Остальные три изложенных метода нерациональны. Отметим, что уравнения любой из линий передачи, будучи отнесены к синхронной системе осей, имеют совершенно одинаковый вид. То же относится к любой из статических нагрузок.

Например, для линии Л2:

$$\begin{aligned} u_{d2} \cos(\theta_2 - \theta_0) - u_{q2} \sin(\theta_2 - \theta_0) &= \\ = u_{d3} \cos(\theta_3 - \theta_0) - u_{q3} \sin(\theta_3 - \theta_0) &- \\ - r_{\alpha 2} i_{\alpha 2d}^{(o)} - L_{\alpha 2p} \frac{di_{\alpha 2d}^{(o)}}{dt} + \omega_0 L_{\alpha 2p} i_{\alpha 2q}^{(o)}; & \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} u_{q2} \cos(\theta_2 - \theta_0) + u_{d2} \sin(\theta_2 - \theta_0) &= \\ = u_{q3} \cos(\theta_3 - \theta_0) + u_{d3} \sin(\theta_3 - \theta_0) &- \\ - r_{\alpha 2} i_{\alpha 2q}^{(o)} - L_{\alpha 2p} \frac{di_{\alpha 2q}^{(o)}}{dt} - \omega_0 L_{\alpha 2p} i_{\alpha 2d}^{(o)}. & \end{aligned} \quad (25)$$

Продольная, поперечная и нулевая составляющие любой из величин, например тока  $i_{\alpha 2}$ , отнесенные к синхронной системе осей, определяются равенствами

$$\left. \begin{aligned} i_{\alpha 2d}^{(o)} &= \frac{2}{3} [i_{\alpha 2a} \cos \theta_0 + i_{\alpha 2b} \cos (\theta_0 - 120^\circ) + i_{\alpha 2c} \cos (\theta_0 + 120^\circ)]; \\ i_{\alpha 2q}^{(o)} &= -\frac{2}{3} [i_{\alpha 2a} \sin \theta_0 + i_{\alpha 2b} \sin (\theta_0 - 120^\circ) + i_{\alpha 2c} \sin (\theta_0 + 120^\circ)]; \\ i_{\alpha 20}^{(o)} &= i_{\alpha 20} = \frac{1}{3} [i_{\alpha 2a} + i_{\alpha 2b} + i_{\alpha 2c}]. \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

Индекс  $o$  в показателе указывает, что соответствующие величины отнесены к синхронной системе осей. Для нагрузки  $H_2$

$$\begin{aligned} 0 &= u_{d2} \cos(\theta_2 - \theta_0) - u_{q2} \sin(\theta_2 - \theta_0) - \\ - r_{\alpha 2} i_{\alpha 2d}^{(o)} - L_{\alpha 2p} \frac{di_{\alpha 2d}^{(o)}}{dt} + \omega_0 L_{\alpha 2p} i_{\alpha 2q}^{(o)}; \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} 0 &= u_{q2} \cos(\theta_2 - \theta_0) + u_{d2} \sin(\theta_2 - \theta_0) - \\ - r_{\alpha 2} i_{\alpha 2q}^{(o)} - L_{\alpha 2p} \frac{di_{\alpha 2q}^{(o)}}{dt} - \omega_0 L_{\alpha 2p} i_{\alpha 2d}^{(o)}. \end{aligned} \quad (28)$$

Так же и уравнения 1-го закона Кирхгофа в узлах, будучи отнесены к синхронной системе осей, имеют совершенно одинаковый вид. Например, для узла 2 имеем:

$$\begin{aligned} i_{\alpha 1d}^{(o)} + i_{d2} \cos(\theta_2 - \theta_0) - i_{q2} \sin(\theta_2 - \theta_0) &+ \\ + i_{\alpha 2d}^{(o)} - i_{\alpha 2d}^{(o)} &= 0; \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} i_{\alpha 1q}^{(o)} + i_{q2} \cos(\theta_2 - \theta_0) + i_{d2} \sin(\theta_2 - \theta_0) &+ \\ + i_{\alpha 2q}^{(o)} - i_{\alpha 2q}^{(o)} &= 0. \end{aligned} \quad (30)$$

Заметим далее, что в силу симметрии схемы рис. 1 уравнения линий и нагрузок можно отнести к вращающимся осям, жестко связанным с ротором любого из генераторов. Но даже в этом случае можно отметить, что предлагаемый нами метод выбора вращающихся координатных осей имеет некоторые преимущества в части общего числа нелинейных членов в уравнениях по сравнению с методом, предложенным А. А. Вороновым. Именно в уравнениях всех линий и нагрузок при записи их по нашему методу все члены, представляющие собой э. д. с. вращения вида  $L_i \frac{d\theta_1}{dt}$  и  $L_i \frac{d\theta_1}{dt}$ , — нелинейны, в то время

как в уравнениях (24), (25), (27) и (28) они линейны и равны соответственно  $L_i \omega_0$  и  $L_i \omega_0$ . Итак, применительно к схеме рис. 1 при записи уравнений по нашему методу имеем 12 лишних нелинейных членов указанного вида (вместо 12

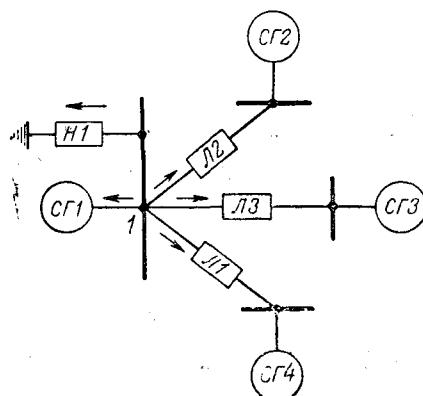


Рис. 3.

линейных членов при отнесении уравнений линий и нагрузок к синхронным осям). Уравнения линий, нагрузок и уравнения 1-го закона Кирхгофа, не связанные с первым генератором, к осям которого мы их относили, записываются по обоим методам совершенно одинаково, что легко видеть, сравнивая уравнения (6), (7), (12)...(15), (18)...(21), с одной стороны, и уравнения (24), (25), (27)...(30), — с другой. Однако уравнения всех линий, нагрузок и уравнения 1-го закона Кирхгофа, связанные с шинами первого генератора, проще при записи по нашему методу, так как при этом имеем на 16 нелинейных членов вида:

$$\begin{aligned} u_d & \left\{ \cos(\theta_1 - \theta_0) \right\} \\ u_q & \left\{ \sin(\theta_1 - \theta_0) \right\} \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} i_d & \left\{ \cos(\theta_1 - \theta_0) \right\} \\ i_q & \left\{ \sin(\theta_1 - \theta_0) \right\} \end{aligned}$$

меньше, чем при отнесении тех же уравнений к синхронным осям. Таким образом, по общему числу нелинейных членов во всех уравнениях системы предлагаемый метод несколько проще, так как он имеет применительно к схеме рис. 1 на четыре нелинейных члена указанного вида меньше. Некоторым его недостатком является то обстоятельство, что в аргументы  $\sin$  и  $\cos$  входят разности двух неизвестных функций (например,  $\theta_2 - \theta_1$ ), в то время как при отнесении уравнений к синхронным осям в них входят разности одной неизвестной и одной известной функции (например,  $\theta_1 - \theta_0 = \theta_1 - \omega_0 t - \theta_{00}$ ). Однако можно привести ряд схем (например, схема рис. 3), где предлагаемый метод выбора вращающейся системы координат приведет к более простой системе уравнений. В схеме рис. 3 все линии идут от узла 1 и нагрузка имеется только в узле 1. Относя уравнения всех линий и нагрузок к осям, жестко связанным с ротором первого генератора, получим, что во всей системе уравнений общее число нелинейных членов указанного выше вида будет на 12 меньше, чем при отнесении уравнений всех линий и нагрузок к синхронным осям.

**Выводы.** 1. Приведено сравнение различных методов выбора вращающихся координатных

осей и указан наиболее рациональный метод с точки зрения максимального упрощения всей уравнений системы.

2. Метод заключается в отнесении уравнений синхронных машин к вращающимся осям, жестко связанным с их роторами, и уравнений всех линий передачи и статических нагрузок к осям, жестко связанным с ротором одной из синхронных машин.

3. В симметричных схемах (рис. 1) можно относить уравнения линий и нагрузок к осям, жестко связанным с ротором любой из синхронных машин. В несимметричных схемах (рис. 3) решение этого вопроса определяется структурой схемы.

4. Показано на примере довольно сложной схемы рис. 1, как составлять без вывода уравнения линий передачи и статических нагрузок при отнесении их к осям, жестко связанным с ротором любой из синхронных машин, и к синхронным осям.

5. Из работы следует метод составления уравнений для схемы с произвольным числом синхронных машин, линий передачи и статических нагрузок.

6. Предложен метод составления уравнений для определения мгновенных значений всех токов, напряжений и электромагнитных моментов синхронных машин электрической системы, возникающих во время тех или иных переходных электромеханических процессов, перечисленных во введении.

7. Полагая  $\frac{d\theta_1}{dt} = \omega_1$ ,  $\frac{d\theta_2}{dt} = \omega_2$  и  $\frac{d\theta_3}{dt} = \omega_3$  постоянными, получаем уравнения симметричных переходных электромагнитных процессов при постоянных скоростях вращения роторов синхронных машин, теория и уравнения которых получаются как частный случай из проведенных нами исследований.

**Приложение I.** Вывод уравнений линии  $L_2$ . Запишем уравнения закона Ома для второй линии, отнесенные к неподвижной системе координатных осей:

$$\left. \begin{aligned} u_{a2} &= u_{a3} - \left( r_{a2} i_{a2a} + \frac{d\phi_{a2a}}{dt} \right); \\ u_{b2} &= u_{b3} - \left( r_{a2} i_{a2b} + \frac{d\phi_{a2b}}{dt} \right); \\ u_{c2} &= u_{c3} - \left( r_{a2} i_{a2c} + \frac{d\phi_{a2c}}{dt} \right). \end{aligned} \right\} \quad (I.1)$$

Запишем выражения продольной, поперечной и нулевой составляющих напряжений, токов и потокосцеплений второй линии, отнесенные к соответствующим вращающимся осям:

$$\left. \begin{aligned} u_{a2} &= \frac{2}{3} [u_{a2} \cos \theta_2 + u_{b2} \cos(\theta_2 - 120^\circ) + \\ &+ u_{c2} \cos(\theta_2 + 120^\circ)]; \\ u_{q2} &= -\frac{2}{3} [u_{a2} \sin \theta_2 + u_{b2} \sin(\theta_2 - 120^\circ) + \\ &+ u_{c2} \sin(\theta_2 + 120^\circ)]; \\ u_{o2} &= \frac{1}{3} [u_{a2} + u_{b2} + u_{c2}]. \end{aligned} \right\} \quad (I.2)$$

$$\left. \begin{aligned} u_{d3} &= \frac{2}{3} [u_{a3} \cos \theta_3 + u_{b3} \cos (\theta_3 - 120^\circ) + \\ &\quad + u_{c3} \cos (\theta_3 + 120^\circ)]; \end{aligned} \right\} \quad (I,3)$$

$$\left. \begin{aligned} u_{q3} &= -\frac{2}{3} [u_{a3} \sin \theta_3 + u_{b3} \sin (\theta_3 - 120^\circ) + \\ &\quad + u_{c3} \sin (\theta_3 + 120^\circ)]; \end{aligned} \right\} \quad (I,3)$$

$$u_{o3} = \frac{1}{3} [u_{a3} + u_{b3} + u_{c3}].$$

$$i_{x2d} = \frac{2}{3} [i_{x2a} \cos \theta_1 + i_{x2b} \cos (\theta_1 - 120^\circ) + \\ + i_{x2c} \cos (\theta_1 + 120^\circ)];$$

$$i_{x2q} = -\frac{2}{3} [i_{x2a} \sin \theta_1 + i_{x2b} \sin (\theta_1 - 120^\circ) + \\ + i_{x2c} \sin (\theta_1 + 120^\circ)];$$

$$i_{x2o} = \frac{1}{3} [i_{x2a} + i_{x2b} + i_{x2c}];$$

$$\psi_{x2d} = \frac{2}{3} [\psi_{x2a} \cos \theta_1 + \psi_{x2b} \cos (\theta_1 - 120^\circ) + \\ + \psi_{x2c} \cos (\theta_1 + 120^\circ)];$$

$$\psi_{x2q} = -\frac{2}{3} [\psi_{x2a} \sin \theta_1 + \psi_{x2b} \sin (\theta_1 - 120^\circ) + \\ + \psi_{x2c} \sin (\theta_1 + 120^\circ)];$$

$$\psi_{x2o} = \frac{1}{3} [\psi_{x2a} + \psi_{x2b} + \psi_{x2c}].$$

Умножим первое уравнение (I,1) на  $\frac{2}{3} \cos \theta_1$ , второе — на  $\frac{2}{3} \cos (\theta_1 - 120^\circ)$ , третье — на  $\frac{2}{3} \cos (\theta_1 + 120^\circ)$ . сложим их и, учитывая соотношения (5), (1,2), (1,3), (1,4) и (1,5), после преобразований получим приведенное выше уравнение (6). Это преобразование будем в дальнейшем называть косинусным преобразованием.

Умножим первое уравнение (I,1) на  $-\frac{2}{3} \sin \theta_1$ , второе — на  $-\frac{2}{3} \sin (\theta_1 - 120^\circ)$ , третье — на  $-\frac{2}{3} \sin (\theta_1 + 120^\circ)$ . сложим их и, учитывая те же соотношения, после преобразований получим приведенное выше уравнение (7). Это преобразование будем в дальнейшем называть синусным преобразованием.

**Приложение II.** Вывод уравнений нагрузки  $H2$ . Запишем уравнения закона Ома для нагрузки  $H2$ , отнесенные к неподвижной системе координатных осей:

$$\left. \begin{aligned} 0 &= u_{a2} - \left( r_{H2} i_{H2a} + \frac{d\psi_{H2a}}{dt} \right); \\ 0 &= u_{b2} - \left( r_{H2} i_{H2b} + \frac{d\psi_{H2b}}{dt} \right); \\ 0 &= u_{c2} - \left( r_{H2} i_{H2c} + \frac{d\psi_{H2c}}{dt} \right). \end{aligned} \right\} \quad (II,1)$$

Фазные потокосцепления и токи нагрузки  $H2$  связаны соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} \psi_{H2a} &= L_{H2} i_{H2a} + M_{H2} i_{H2b} + M_{H2} i_{H2c}; \\ \psi_{H2b} &= M_{H2} i_{H2a} + L_{H2} i_{H2b} + M_{H2} i_{H2c}; \\ \psi_{H2c} &= M_{H2} i_{H2a} + M_{H2} i_{H2b} + L_{H2} i_{H2c}. \end{aligned} \right\} \quad (II,2)$$

Запишем выражения продольной, поперечной и нулевой составляющих тока и потокосцепления нагрузки  $H2$ , отнесенные к осям, жестко связанным с ротором первого генератора:

$$i_{H2d} = \frac{2}{3} [i_{H2a} \cos \theta_1 + i_{H2b} \cos (\theta_1 - 120^\circ) + \\ + i_{H2c} \cos (\theta_1 + 120^\circ)];$$

$$i_{H2q} = -\frac{2}{3} [i_{H2a} \sin \theta_1 + i_{H2b} \sin (\theta_1 - 120^\circ) + \\ + i_{H2c} \sin (\theta_1 + 120^\circ)];$$

$$i_{H2o} = \frac{1}{3} [i_{H2a} + i_{H2b} + i_{H2c}];$$

$$\psi_{H2d} = \frac{2}{3} [\psi_{H2a} \cos \theta_1 + \psi_{H2b} \cos (\theta_1 - 120^\circ) + \\ + \psi_{H2c} \cos (\theta_1 + 120^\circ)];$$

$$\psi_{H2q} = -\frac{2}{3} [\psi_{H2a} \sin \theta_1 + \psi_{H2b} \sin (\theta_1 - 120^\circ) + \\ + \psi_{H2c} \sin (\theta_1 + 120^\circ)].$$

Подвергнув уравнения (II,1) косинусному преобразованию, сложим их почленно и, учитывая соотношения (5), (1,2) (II,3) и (II,4), получим:

$$\left. \begin{aligned} 0 &= u_{d2} \cos (\theta_2 - \theta_1) - u_{q2} \sin (\theta_2 - \theta_1) - r_{H2} i_{H2d} - \frac{d\psi_{H2d}}{dt} + \\ &\quad + \psi_{H2q} \frac{d\theta_1}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (II,5)$$

Подвергнув уравнения (6) синусному преобразованию, сложим их почленно и, учитывая указанные выше соотношения, получим:

$$\left. \begin{aligned} 0 &= u_{q2} \cos (\theta_2 - \theta_1) + u_{d2} \sin (\theta_2 - \theta_1) - r_{H2} i_{H2q} - \frac{d\psi_{H2q}}{dt} - \\ &\quad - \psi_{H2a} \frac{d\theta_1}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (II,6)$$

Уравнения, связанные потокосцепления  $\psi_{H2d}$ ,  $\psi_{H2q}$ ,  $\psi_{H2o}$  и токи  $i_{H2d}$ ,  $i_{H2q}$ ,  $i_{H2o}$  нагрузки  $H2$ , получим, если в соотношениях (II,4) заменим  $\psi_{H2a}$ ,  $\psi_{H2b}$  и  $\psi_{H2c}$  согласно равенствам (II,4) и учтем при преобразованиях равенства (II,3):

$$\left. \begin{aligned} \psi_{H2d} &= i_{H2d} (L_{H2} - M_{H2}) = i_{H2d} L_{H2p}; \\ \psi_{H2q} &= i_{H2q} (L_{H2} - M_{H2}) = i_{H2q} L_{H2p}; \\ \psi_{H2o} &= i_{H2o} (L_{H2} + 2M_{H2}) = i_{H2o} L_{H2o}. \end{aligned} \right\} \quad (II,7)$$

Подставляя значения  $\psi_{H2d}$  и  $\psi_{H2q}$  из (II,7), в (II,5) и (II,6), получим уравнения (12) и (13).

**Приложение 3.** Вывод уравнений 1-го закона Кирхгофа для узла 2. Запишем уравнения 1-го закона Кирхгофа для узла 2, отнесенные к неподвижной системе координатных осей:

$$\left. \begin{aligned} i_{11a} + i_{a2} + i_{H2a} - i_{x2a} &= 0; \\ i_{11b} + i_{b2} + i_{H2b} - i_{x2b} &= 0; \\ i_{11c} + i_{c2} + i_{H2c} - i_{x2c} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (III,1)$$

Запишем выражения продольной, поперечной и нулевой составляющих токов линии  $LI$ , отнесенные к осям, жестко связанным с ротором первого генератора, и токов генератора 2, отнесенные к осям, жестко связанным с его ротором:

$$\left. \begin{aligned} i_{a1d} &= \frac{2}{3} [i_{a1a} \cos \theta_1 + i_{a1b} \cos (\theta_1 - 120^\circ) + \\ &\quad + i_{a1c} \cos (\theta_1 + 120^\circ)]; \\ i_{a1q} &= -\frac{2}{3} [i_{a1a} \sin \theta_1 + i_{a1b} \sin (\theta_1 - 120^\circ) + \\ &\quad + i_{a1c} \sin (\theta_1 + 120^\circ)]; \\ i_{a1o} &= \frac{1}{3} [i_{a1a} + i_{a1b} + i_{a1c}]; \\ i_{a2d} &= \frac{2}{3} [i_{a2} \cos \theta_2 + i_{b2} \cos (\theta_2 - 120^\circ) + \\ &\quad + i_{c2} \cos (\theta_2 + 120^\circ)]; \\ i_{q2} &= -\frac{2}{3} [i_{a2} \sin \theta_2 + i_{b2} \sin (\theta_2 - 120^\circ) + \\ &\quad + i_{c2} \sin (\theta_2 + 120^\circ)]; \\ i_{o2} &= \frac{1}{3} [i_{a2} + i_{b2} + i_{c2}]. \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} (III,2) \\ (III,3) \end{array}$$

Подвернув уравнения (III,1) косинусному и затем синусному преобразованиям, сложим их почленно и, учитывая соотношения (5), (I,4), (II,3), (II,2) и (III,3), после преобразований получим уравнения (18) и (19).

### Литература

1. А. А. Горев. Переходные процессы синхронной машины. Л.—М., Госэнергоиздат, 1950.
2. R. H. Park. Two-Reaction Theory of Synchronous Machines, Trans. AIEE, т. 48, стр. 716, 1929.
3. С. В. Страхов. Уравнения переходных электромеханических процессов в системе двух синхронных машин, связанных линией передачи. Труды МЭИ, вып. XIV, Госэнергоиздат, 1953.
4. А. Г. Иосифьян. Теория преобразований дифференциальных уравнений синхронной машины. Доклады А. Н. Армянской ССР, т. VII, стр. 3, 1947.

[25. 7. 1953]

◆ ◆ ◆

## Коррекция частотных характеристик вибраторного осциллографа

*Кандидат техн. наук, доц. Р. Р. ХАРЧЕНКО*

*Московский энергетический институт им. Молотова*

Значение вибраторного (шлейфового) осциллографа в научно-исследовательской работе трудно переоценить. Над его усовершенствованием непрерывно работают в различных направлениях. В частности, ведутся поиски возможностей либо повысить чувствительность вибраторов при некотором уменьшении рабочей полосы частот, либо увеличить рабочую полосу частот при незначительной потере чувствительности.

Первое приводит к проблеме разработки приборостроительной промышленностью рамочных вибраторов вместо петлевых, второе — к проблеме коррекции существующих петлевых вибраторов посредством внешних корректирующих схем.

Настоящая работа имеет целью показать инженерное решение второй проблемы, доступное в смысле реализации широкому кругу лиц, использующих осциллограф.

**Современное состояние вопроса.** В литературе известна одна классическая работа по коррекции вибраторного осциллографа, принадлежащая А. А. Харкевичу [Л. 1], который впервые предложил и теоретически обосновал новый, имеющий фундаментальное значение принцип нормальной коррекции (термин наш), существование которого сводится к следующему.

Согласно общепринятым представлениям поведение вибратора при любом динамическом режиме определяется только двумя параметрами:

Описывается теоретическое и экспериментальное исследование коррекции вибраторного осциллографа. Выполнен синтез и анализ корректирующих схем. Установлена методика расчета типовых корректирующих приставок к осциллографу. Показано, что коррекция является весьма эффективным средством для улучшения динамических характеристик осциллографа.

частотой собственных колебаний (в масле)  $f_o$  и степенью успокоения  $\beta$ . Через эти два параметра выражаются в безразмерных координатах частотные характеристики вибратора:

амплитудная

$$v = \frac{1}{\sqrt{(1 - k^2)^2 - (2\beta k)^2}} \quad (1)$$

и фазовая

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\beta k}{1 - k^2},$$

где  $k = \frac{f}{f_o}$ .

Типовое семейство кривых динамической восприимчивости вибратора, т. е. семейство кривых  $v=f(k)$ , построенное по уравнению (1), показано на рис. 1 (сплошные линии).

Предполагается, что любой вибратор без конструктивных дефектов при любых значениях  $f_o$  и  $\beta$  имеет частотную характеристику, совпадающую с одной из кривых типового семейства.

Если включить вибратор на выход произвольно выбранного пассивного четырехполюсника, содержащего реактивные элементы, и всю получившуюся комбинацию рассматривать как некоторый эквивалентный, корректированный вибратор, то окажется, что его амплитудо-частотная характеристика в общем случае не совпадает ни с одной кривой типо-

вого семейства, так как она не выражается теперь уравнением (1). Будет ли она лучше или хуже, чем была собственная характеристика вибратора, — сказать нельзя, если неизвестны процессы, записываемые корректированным вибратором.

Однако здесь возможен частный случай, когда характеристика эквивалентного (корректированного) вибратора попрежнему выражается уравнением (1) и дает кривую, вписываемую в типовое семейство  $\nu = f(k)$ . В таком случае определяющие эту кривую параметры можно назвать степенью успокоения  $\beta_\kappa$  и частотой собственных колебаний  $(f_o)_\kappa$  корректированного вибратора. Если окажется, что  $(f_o)_\kappa > f_o$ , то при прочих равных условиях (например,  $\beta_\kappa = \beta$ ) корректированный вибратор по своим динамическим свойствам лучше некорректированного независимо от характера записываемого процесса.

Коррекцию этого вида, основанную на подобии характеристик, мы и называем нормальной. Не нужно доказывать, что для массового потребителя осциллографа могут быть приемлемы только такие корректирующие приставки к вибраторам, которые дают нормальную коррекцию; в противном случае пришлось бы заново изучить неопределенно большое количество новых частотных характеристик и соответствующих им переходных функций.

Второй вопрос, который был поставлен А. А. Харкевичем, — это о критерии для сравнения корректированного вибратора с некорректированным.

Известно, что если у вибратора повысить жесткость растяжек, то частота его собственных колебаний увеличится, а чувствительность уменьшится. Увеличение частоты  $\eta_m$  и уменьшение чувствительности  $\varepsilon_m$  связаны в данной конструкции соотношением  $\eta_m^2 \varepsilon_m = 1$ .

Если у этого же вибратора изменить частоту собственных колебаний в  $\eta$  раз не механическим способом, а посредством нормальной коррекции, то будет иметь место потеря чувствительности, определяемая коэффициентом  $\varepsilon = \frac{I}{I_\kappa}$ , где  $I$  и  $I_\kappa$  — постоянный ток соответственно в выходной и входной цепи корректирующей схемы.

Теперь надо сравнить величины  $\eta^2 \varepsilon$  и  $\eta_m^2 \varepsilon_m = 1$ . При  $\eta^2 \varepsilon \leq 1$  коррекция не дает выгоды по сравнению со способом механической переделки вибратора или, говоря иначе, — с переходом на другой, более высокочастотный вибратор из серии. При  $\eta^2 \varepsilon > 1$  коррекция выгодна.

Основным содержанием работы А. А. Харкевича является показательный приближенный расчет (без учета некоторых параметров) двух корректирующих схем, взятых из литературы; одна из них называется схемой Ирвина, вторая — схемой Кертиса; последняя схема для стандартных вибраторов непригодна.

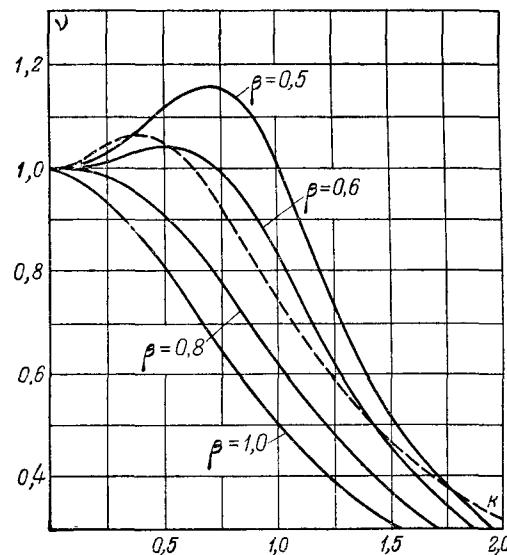


Рис. 1. Кривые динамической восприимчивости вибратора.  
Грубая аппроксимация.

В исследовании А. А. Харкевича имеются следующие недостатки:

1. Со стороны теоретической — не подчеркнуто, что, кроме двух рассмотренных схем, могут существовать и другие схемы нормальной коррекции, еще не найденные. Не замечено вовсе, что коррекция сопровождается: а) токовой перегрузкой вибратора; б) увеличением входного сопротивления; в) необходимостью обеспечить удобную регулировку элементов корректирующей схемы, так как собственные характеристики вибраторов резко зависят от температуры.

Следовательно, о возможностях коррекции надо судить не по одному критерию, а по четырем.

2. Со стороны практической не было экспериментальной проверки коррекции. Мы эту проверку осуществили для схемы Ирвина, которая предварительно была рассчитана по А. А. Харкевичу с учетом всех параметров.

Коррекции не получилось. Причины будут указаны ниже.

Отмеченные недостатки не умаляют значения труда А. А. Харкевича, которого мы считаем основоположником теории нормальной коррекции осциллографа.

**Реальная частотная характеристика вибратора.** Чтобы определить характеристику вибратора  $\nu = f(k)$ , надо: 1) снять его амплитудо-частотную характеристику  $A = \varphi(f)$ ; 2) найти по методу Шеринга [Л. 2] параметры  $\beta$  и  $f_o$ ; 3) перейти к безразмерным координатам  $\nu = \frac{A}{A_{f=o}}$  и  $k = \frac{f}{f_o}$ .

Если найденную указанным способом кривую начертить в той же сетке координат, в которой построено теоретическое семейство кривых  $\nu = f(k)$ , то она в семейство не впишется. Это

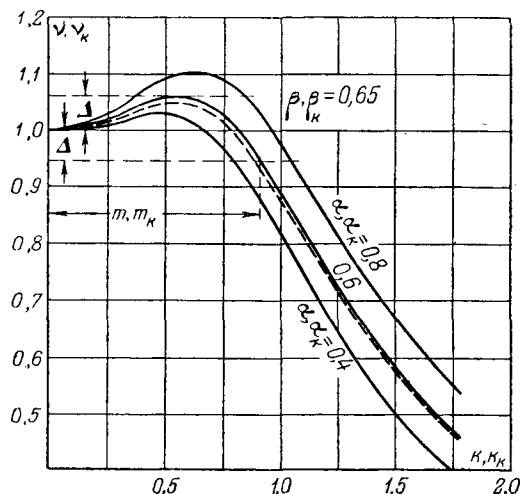


Рис. 2. Кривые динамической восприимчивости вибратора.  
Точная аппроксимация.

иллюстрируется пунктирной линией на рис. 1. Значит уравнение (1) не выражает аналитически реальную частотную характеристику вибратора, а только грубо аппроксимирует ее. Причиной служит нелинейность вибратора (непостоянство коэффициентов дифференциального уравнения движения).

Возникает серьезная и важная для коррекции задача: найти новое линейное уравнение частотной характеристики — такое, чтобы оно в некотором диапазоне частот более точно аппроксимировало реальную характеристику вибратора.

Автор, исследовав большое количество вибраторов и развивая далее разработанный им метод опыта определения  $\beta$  и  $f_o$  [Л. 2], предложил для области  $k = 0 \dots 2$  уравнение в виде:

$$\nu^* = \frac{1 + j\alpha k}{1 - k^2 + j2\beta k}. \quad (2)$$

Отсюда динамическая восприимчивость вибратора

$$\nu = \frac{\sqrt{1 + \alpha^2 k^2}}{\sqrt{(1 - k^2)^2 + (2\beta k)^2}} \quad (3)$$

и фазовый угол

$$\varphi = \arctg \frac{2\beta k}{1 - k^2} - \arctg \alpha k. \quad (4)$$

Из сравнения (1) и (3) видно, что новое выражение  $\nu$  отличается от прежнего, общепринятого выражения множителем  $\sqrt{1 + \alpha^2 k^2}$ , который с увеличением частоты возрастает. Отличается, естественно, и фазовая характеристика, так как она связана с амплитудой. Кроме того, прежнее выражение определялось только двумя параметрами  $\beta, f_o$ , в то время как в новом выражении появился третий параметр  $\alpha$ . Поэтому новое типовое семейство безразмерных частотных характеристик нельзя изобразить на двухкоординатном графике. Можно поступить следующим образом: фиксировать ряд значений  $\beta$  и для

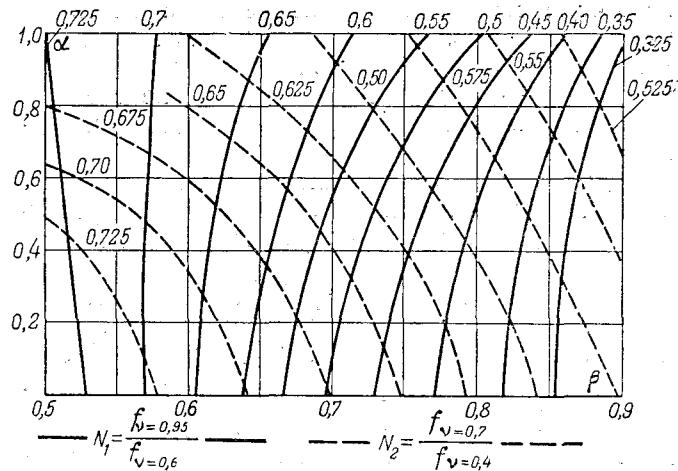


Рис. 3. Номограмма для определения параметров  $\alpha$  и  $\beta$  вибраторов.

каждого из них построить кривые  $\nu = f(k)$  при  $\alpha = \text{пост}$  в качестве параметра. Одно из таких семейств показано на рис. 2.

Теперь необходимо решить другую задачу: как по полученной опытным путем характеристике вибратора  $A = \varphi(f)$  найти параметры  $\alpha, \beta, f_o$  — с тем, чтобы можно было эту характеристику выразить аналитически и, вписав ее в соответствующее типовое семейство, проверить правильность уравнения (3).

Ясно, что метод Шеринга для этой цели вовсе не подходит. Автор предложил следующий специальный метод (метод секущих).

На графике, изображающем экспериментально полученную частотную характеристику вибратора, проводятся четыре прямые:  $\nu = 0,95$ ;  $\nu = 0,7$ ;  $\nu = 0,6$ ;  $\nu = 0,4$ , параллельные оси абсцисс. Прямые пересекают частотную характеристику в четырех точках. Абсциссы этих точек:  $f_{\nu=0,95}$ ;  $f_{\nu=0,7}$ ;  $f_{\nu=0,6}$ ;  $f_{\nu=0,4}$  измеряются, и затем подсчитываются два отношения:

$$N_1 = \frac{f_{\nu=0,95}}{f_{\nu=0,6}} \quad \text{и} \quad N_2 = \frac{f_{\nu=0,7}}{f_{\nu=0,4}}.$$

Полученные значения  $N_1$  и  $N_2$  однозначно определяют  $\alpha$  и  $\beta$  по номограмме на рис. 3. Номограмма построена путем аналитического расчета тех же отношений  $N_1$  и  $N_2$  из уравнения (3).

Идея нового метода такова: если по Шерингу реальная и теоретическая характеристики совпадают только в одной точке ( $k = 1$ ), то здесь они совпадают в четырех точках, крайние из которых фиксируют весьма широкий отрезок характеристики от  $\nu = 0,95$  до  $\nu = 0,4$ . После определения  $\alpha$  и  $\beta$  величина  $f_o$  находится просто: в уравнение (3) надо подставить  $k = 1$ ; тогда  $\nu_{k=1} = \frac{\sqrt{1 + \alpha^2}}{2\beta}$ . Соответствующая этому значению абсцисса частотной характеристики вибратора дает искомое  $f_o$ .

На рис. 2 пунктирной линией показана реальная характеристика одного вибратора, вписанная в типовое семейство, построенное по уравнению (3). Видно, что уравнение (3) весьма точно аппроксимирует частотную характеристику вибратора и поэтому может применяться для расчетов коррекции.

Фазовая характеристика проверена осциллографами: угол  $\varphi$  при частоте  $f_o$  (по Харченко) получается меньше  $90^\circ$  — в полном соответствии с уравнением (4).

Исследование характеристик большого количества вибраторов показало, что расхождение в значениях  $f_o$ , найденных по методу Шеринга и по методу Харченко, составляет 20—25%; значение параметра  $a$  для разных типов вибраторов и диапазона температур 10...35°C находится в пределах 0,25...0,85. Эти факты и служат причиной тому, что схема Ирвина, рассчитанная по А. А. Харкевичу, не дает коррекции.

**Нахождение корректирующих схем.** Согласно принципу нормальной коррекции, частотные характеристики некорректированного и корректированного вибраторов должны быть подобными. Следовательно, базируясь на уравнении (2), мы должны получить после коррекции

$$\frac{*}{v} = \frac{1 + j\alpha_k k_k}{1 - k_k^2 + j2\beta_k k_k}, \quad (5)$$

где  $k_k = \frac{f}{(f_o)_k}$ .

Сделаем подстановку  $j\omega = p$  и запишем уравнения частотной характеристики в форме: до коррекции

$$\frac{*}{v} = \frac{1 + \frac{\alpha}{\omega_o} p}{1 + \frac{2\beta}{\omega_o} p + \frac{1}{\omega_o^2} p^2}, \quad (6)$$

после коррекции

$$\frac{*}{v} = \frac{1 + \frac{\alpha_k}{(\omega_o)_k} p}{1 + \frac{2\beta_k}{(\omega_o)_k} p + \frac{1}{(\omega_o)_k^2} p^2}. \quad (7)$$

Для дальнейшего анализа условимся в целях сокращения записи обозначать полный полином вида  $1 + ap + bp^2 + \dots + ip^n$  через  $N^n$  в числителе и  $\Pi^n$  в знаменателе.

Тогда уравнения (6) и (7) выразятся структурными формулами:

$$\frac{*}{v} = \frac{N^1}{\Pi^2}, \quad (8)$$

$$\frac{*}{v_k} = \frac{N_k^1}{\Pi_k^2}. \quad (9)$$

Теперь определим чувствительность вибратора к току соответственно до и после коррекции.

Очевидно

$$\frac{*}{S} = \frac{\dot{A}}{I} = S^*, \quad (10)$$

где  $S$  — чувствительность при  $f=0$ , т. е. на постоянном токе. Подобно этому

$$\frac{*}{S_k} = \frac{\dot{A}}{I_k} = \frac{\dot{I}}{I_k} \cdot \frac{\dot{A}}{\dot{I}} = \frac{*}{S_{cx}} \frac{*}{S}, \quad (11)$$

где  $I_k$  и  $I$  — токи во входной и выходной цепи корректирующей схемы.

Выражение  $\frac{*}{S_{cx}} = \frac{\dot{I}}{I_k}$  есть комплексный коэффициент передачи корректирующей схемы, нагруженной сопротивлением вибратора. Реакцией вибратора на схему можно пренебречь, так как она ничтожно мала.

По аналогии с (10), можно записать  $\frac{*}{S_{cx}}$  в виде  $\frac{*}{S_{cx}} = S_{cx} \frac{*}{v_{cx}}$ , где  $S_{cx}$  — коэффициент передачи на постоянном токе, численно равный коэффициенту чувствительности вибратора при коррекции  $\epsilon$ .

Комплексную величину  $\frac{*}{v_{cx}}$  целесообразно в общем виде выразить структурной формулой

$$\frac{*}{v_{cx}} = \frac{N_{cx}^n}{\Pi_{cx}^m}. \quad (12)$$

Известно, что разным четырехполюсным схемам соответствуют в формуле (12) разные показатели степени  $n$  и  $m$  (причем всегда  $n \leq m$ ), а некоторые схемы и вовсе не характеризуются этой формулой, так как они дают укороченные полиномы относительно  $p$ .

Для нас особый интерес представляют схемы со структурной формулой  $\frac{*}{v_{cx}} = \frac{N_{cx}^2}{\Pi_{cx}^2}$ . Именно они и позволяют осуществить нормальную коррекцию. Действительно, с одной стороны, мы хотим (независимо от схемы) получить по определению (9)

$$\frac{*}{S_k} = S_k \frac{N_k^1}{\Pi_k^2}. \quad (13)$$

С другой стороны, применяя схемы класса  $\frac{N_{cx}^2}{\Pi_{cx}^2}$ , получим по определению (11)

$$\frac{*}{S_k} = \epsilon S \frac{N_{cx}^2}{\Pi_{cx}^2} \cdot \frac{N^1}{\Pi^2}. \quad (14)$$

Здесь в общем случае, при произвольно выбранных параметрах схемы, числитель выразится полиномом третьей степени и знаменатель — полиномом четвертой степени относительно  $p$ . Но если подобрать параметры схемы так, чтобы  $N_{cx}^2 = \Pi^2$ , то эти множители в (14) сократятся и результатом коррекции будет:

$$\frac{*}{S_k} = \epsilon S \frac{N^1}{\Pi_{cx}^2}. \quad (15)$$

№	Схема	Частотная характеристика
1		$S_{cx} = \frac{R_1 + r + (R_1 r C + L_1 + M) p + R_1 C (L_1 + M) p^2}{R_1 + r + R_2 + [R_1 (R_2 + r) C + L] p + R_1 C L_1 p^2}$
2		$S_{cx} = \frac{R_1 + M p + R_1 C M p^2}{R_1 + R_2 + (R_1 R_2 C + L_2) p + R_1 C L_2 p^2}$
3		$S_{cx} = \frac{R_1 + (R_1 r C + M) p + (R_1 + r) C M p^2}{R_1 + R_2 + [(R_2 (R_1 + r) + R_1 r) C + L_2] p + (R_1 + r) C L_2 p^2}$
4		$S_{cx} = \frac{R_1 + r + (R_1 r C + M) p + R_1 C M p^2}{R_1 + r + R_2 + [R_1 (R_2 + r) C + L_2] p + R_1 C L_2 p^2}$
5		$S_{cx} = \frac{R_1 + r + (R_1 r C + L_1 - M) p + R_1 C (L_1 - M) p^2}{R_1 + r + R_2 + [R_1 (R_2 + r) C + L_1 + L_2 - 2M] p + R_1 C (L_1 + L_2 - 2M) p^2}$

Рис. 4. Корректирующие схемы.

Сравнение (13) и (15) показывает, что при  $\Pi_{cx}^2 = \Pi_\kappa^2$  требование нормальной коррекции удовлетворяется.

Итак, для полного исследования проблемы коррекции необходимо найти схемы класса  $\Pi_{cx}^2$  и связать их параметры с параметрами не-корректированного и корректированного вибраторов уравнениями:

$$\begin{aligned} N_{cx}^2 &= \Pi^2, \\ \Pi_{cx}^2 &= \Pi_\kappa^2. \end{aligned} \quad (16)$$

Эти связи позволяют вычислить критерий для отбора наилучших схем.

Данную задачу мы решили следующим образом.

Были составлены возможные сочетания элементов  $R$ ,  $C$ ,  $L$ ,  $M$  в четырехполюсниках типа: Г-образных, Т-образных, П-образных, перекрытого  $T$ , мостовых. Схемы с взаимной индуктив-

ностью подвергались трансформации (метод развязки индуктивных связей). Все рассматривавшиеся схемы отвечали техническим условиям: а) общее количество расчетных элементов в схеме должно быть не более шести, включая сопротивление вибратора; б) реактивных сопротивлений должно быть не более трех; в) активное сопротивление катушек индуктивности должно учитываться как самостоятельный элемент; г) схема должна пропускать постоянный ток.

В результате такого синтеза получено 204 схемы. Для них были найдены структурные формулы частотных характеристик (12). Оказалось,

что к классу  $\frac{N_{cx}^2}{\Pi_{cx}^2}$  относятся 75 схем. На эти схемы был составлен каталог развернутых частотных характеристик, необходимых для дальнейшего анализа. Затем была произведена оценка схем по основному критерию  $\eta^2 e$ .

Покажем определение величины  $\eta^2 e$  на примере только одной корректирующей схемы, которая, как потом выяснится, будет лучшей из всех.

Это — схема 2 на рис. 4. Ее частотная характеристика:

$$\begin{aligned} \overset{*}{S}_{cx} = & \varepsilon \frac{N_{cx}^2}{\Pi_{cx}^2} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times \\ & \times \frac{1 + \frac{M}{R_1} p + CMp^2}{1 + \frac{R_1 R_2 C + L_2}{R_1 + R_2} p + \frac{R_1 C L_2}{R_1 + R_2} p^2}. \end{aligned} \quad (17)$$

Развертываем уравнения (16), приняв во внимание (6) и (7):

$$\left. \begin{aligned} 1 + \frac{M}{R_1} p + CMp^2 &= 1 + \frac{2\beta}{\omega_o} p + \frac{1}{\omega_o^2} p^2, \\ 1 + \frac{R_1 R_2 C}{R_1 + R_2} p + \frac{R_1 C L_2}{R_1 + R_2} p^2 &= 1 + \frac{2\beta_k}{(\omega_o)_k} p + \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

$$+ \frac{1}{(\omega_o)_k^2} p^2.$$

Отношение коэффициентов при  $p^2$  дает  $\eta^2 = \frac{(\omega_o)_k^2}{\omega_o^2} = \frac{(R_1 + R_2) CM}{R_1 C L_2}$ . Отсюда  $\eta^2 \varepsilon = \frac{M}{L_2}$ ; при  $M > L_2$  схема для коррекции выгодна.

В результате подобного анализа, который представляет собой первый этап отбора, оказалось, что из 75 схем выгодными для коррекции являются 14. Теперь нужно решить следующий вопрос, для всех ли отобранных схем будет технически целесообразной реализация.

Дополнительный анализ уравнений вида (18) показал, что найденные 14 схем разделяются на три группы:

1. Схемы, физически осуществимые только при условии  $\beta < \frac{\beta_k}{\eta}$ , таких схем пять; заметим, что в их число входит так называемая схема Кертиса, упоминавшаяся ранее.

2. Схемы, физически осуществимые только при условии  $\beta > 1$ ; таких схем четыре;

3. Схемы без ограничений в величине  $\beta$  или в соотношении между  $\beta$  и  $\beta_k$ ; таких схем пять.

Ввиду того, что настоящее исследование имело целью построение корректирующих приставок для серийных вибраторов, т. е. для вибраторов, у которых по техническим условиям заводов-изготовителей значение  $\beta$  (при нормальной температуре) должно быть в пределах 0,6...0,8, мы считаем пригодной для реализации только третью группу схем.

Эта группа изображена на рис. 4. Здесь находится и так называемая схема Ирвина (схема 1); остальные схемы в литературе известны не были.

**Основы расчета корректирующих схем.** Пусть во внешней цепи корректированного и некорректированного вибратора установлены такие значения постоянного тока, при которых вибратор в обоих случаях дает одинаковое отклонение. Если при этих исходных режимах снять частотные характеристики вибратора и представить их ординаты  $\gamma_k$  и  $\gamma$  в безразмерной

форме, то отношение  $\frac{\gamma_k}{\gamma}$ , очевидно, даст значения токовой перегрузки вибратора при коррекции в функции частоты. Это отношение можно рассчитать по уравнениям (2) и (5), согласно которым

$$\begin{aligned} \gamma_k &= \frac{\sqrt{1 + \alpha_k^2 k_k^2}}{\sqrt{(1 - k_k^2)^2 + (2\beta_k k_k)^2}}; \\ \gamma &= \frac{\sqrt{1 + \alpha^2 k^2}}{\sqrt{(1 - k^2)^2 + (2\beta k)^2}}. \end{aligned} \quad (19)$$

Здесь параметры  $\alpha_k$  и  $\alpha$ , а также независимые переменные  $k_k$  и  $k$  различны, сделаем их общими.

Поскольку  $k = \frac{f}{f_o}$ ,  $k_k = \frac{f}{(f_o)_k}$  и  $\frac{(f_o)_k}{f_o} = \eta$ ,

можно применить подстановку

$$k_k = \frac{k}{\eta}; \quad \alpha_k = \alpha \eta. \quad (20)$$

Тогда

$$\frac{\gamma_k}{\gamma} = \frac{\sqrt{(1 - k^2)^2 + (2\beta k)^2}}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{k}{\eta}\right)^2\right]^2 + \left(2\beta_k \frac{k}{\eta}\right)^2}}. \quad (21)$$

Графики, построенные по этому уравнению для  $\beta = \text{const}$ ,  $\beta_k = \text{const}$ , изображены на рис. 5.

Видно, что для каждого фиксированного значения  $\eta$  показатель токовой перегрузки вибратора с увеличением частоты монотонно возрастает, приближаясь к предельному значению

$$\lim \left| \frac{\gamma_k}{\gamma} \right|_{k \rightarrow \infty} = \eta^2.$$

Итак, перегрузка вибратора при коррекции значительна, поэтому чрезмерно расширять полосу пропускания частот не следует.

Опыт показывает, что предельная токовая нагрузка вибраторов при повышенных частотах обусловлена: у мало чувствительных типов — тепловым режимом нитей, у высокочувствительных типов — способностью механических частей выдерживать действие инерционных сил, амплитуда которых возрастает с увеличением  $\eta$ . Мы

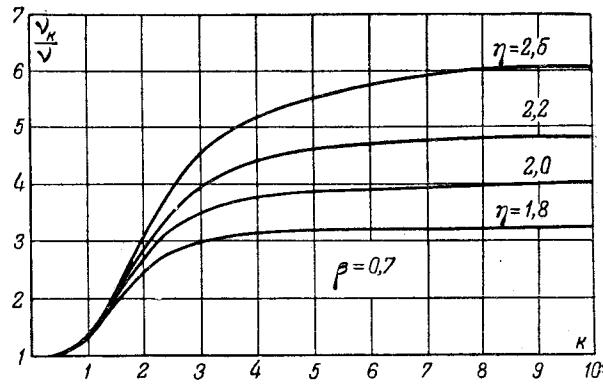


Рис. 5. Кривые токовой перегрузки вибратора при коррекции.

в многочисленных экспериментах допускали для всех типов вибраторов  $\eta = 2,5$  (а для VIII типа доводили  $\eta$  до шести); при этом никаких дефектов ни у одного вибратора не обнаружилось.

Амплитудо-частотные характеристики корректированного и некорректированного вибраторов (19), ввиду их подобия, изображаются общими графиками (рис. 2). Из графиков видно, что рабочая полоса частот  $m$  (или  $m_k$ ) определяется заданной амплитудной погрешностью  $\pm \Delta$  и зависит от значений  $\alpha$  и  $\beta$  (или  $\alpha_k$  и  $\beta_k$ ).

Для расчетов удобно иметь номограмму взаимосвязей величин  $m$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\Delta$  (или соответственно  $m_k$ ;  $\alpha_k$ ;  $\beta_k$ ;  $\Delta$ ). Номограмма вычислена по уравнениям (19) и показана на рис. 6.

Теперь ясен весь порядок нахождения параметров корректирующих схем:

1) по полученной опытным путем частотной характеристике вибратора определяются  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $f_o$  (рис. 3); 2) задается значение  $\eta$ ; 3) определяется значение  $\alpha_k = \alpha\eta$ ; 4) задается амплитудная погрешность  $\pm \Delta$ ; 5) по номограмме рис. 6 находится  $\beta_k$ ; 6) значения  $\beta$ ,  $f_o$  и  $\beta_k$ ,  $(f_o)_k$  подставляются в систему (16), которая развертывается в виде четырех уравнений, подлежащих совместному решению.

Например, для схемы 2 (рис. 4) в соответствии с (18) получаем:

$$\begin{aligned} CM &= \frac{1}{\omega_o^2}; \quad M = \frac{2\beta}{\omega_o}; \quad \frac{R_1 C L_2}{R_1 + R_2} = \frac{1}{(\omega_o)^2_k}; \\ \frac{R_1 R_2 C + L_2}{R_1 + R_2} &= \frac{2\beta_k}{(\omega_o)_k}. \end{aligned} \quad (22)$$

Здесь пять неизвестных; одним задаемся. Естественно задаваться значением  $C$ , так как емкость конденсатора можно выбрать только из дискретного ряда значений. Тогда система (22) имеет решение:

$$\begin{aligned} M &= -\frac{1}{\omega_o^2 C}; \quad R_1 = \frac{1}{2\beta \omega_o C}; \\ R_2 &= \frac{R_1 \left( \frac{\beta_k}{\beta} \eta - 1 \right)}{1 + \left( \frac{\eta}{2\beta} \right)^2 - \frac{\beta_k}{\beta} \eta}; \quad L_2 = \frac{R_1 + R_2}{R_1 C (\omega_o)_k^2}. \end{aligned} \quad (23)$$

Все корректирующие схемы, кроме схемы 2, дают шесть неизвестных. Поэтому для их расчета надо задаваться двумя параметрами или, вообще говоря, пользоваться вариационными методами.

Установив методику расчета, мы подвергли сравнительному анализу все найденные корректирующие схемы (рис. 4). Оказалось, что схема 5, не имея каких-либо преимуществ, представляет чрезвычайные трудности в расчете. Мы ее из рассмотрения исключили. По остальным схемам получены интересные выводы. Прежде чем их изложить, введем еще один показатель качества корректирующей схемы, а именно — ее входное сопротивление  $Z_k$ . Очевидно, что от

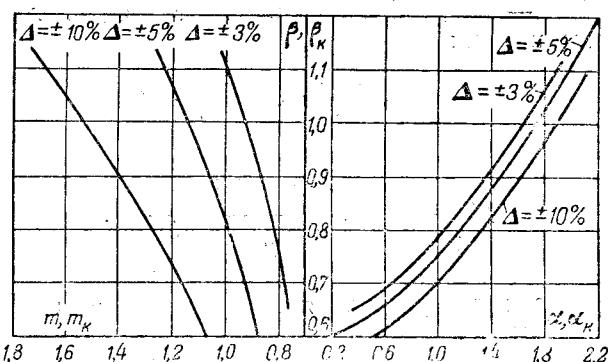


Рис. 6. Номограмма для определения параметров  $\beta_k$  и  $m_k$  при заданной погрешности.

$Z_k$  зависит чувствительность корректированного вибратора к напряжению, так как  $\frac{\dot{S}_k}{Z_k} = \frac{\dot{S}_k}{Z_k}$ , где  $\dot{S}_k$  — чувствительность к току, определяемая формулой (11). Нет нужды доказывать, что корректированный вибратор должен быть универсальным, т. е. приспособленным для включения в цепь любого источника как с большим, так и с малым внутренним сопротивлением. Для этой цели необходимо потребовать, чтобы  $S_{uk}$  не изменялось в пределах полосы пропускания частот, за счет зависимости  $|Z_k|$  от частоты, более чем на  $\pm \Delta$ .

Данное требование выполняется, как показали наши расчеты, если во входную цепь корректирующей схемы включить безреактивное балластное сопротивление  $R_b \geqslant 5 |Z_k|_{f=(f_o)_k}$ . Теперь входным сопротивлением схемы будет величина  $z_{ex} = R_b + Z_k$ , а чувствительность корректированного вибратора к напряжению определится

$$\text{в виде } \frac{\dot{S}_{uk}}{z_{ex}} = \frac{\dot{S}_k}{z_{ex}}.$$

Ниже приводятся результаты расчетов корректирующих схем при условиях:  $\beta = 0,7$ ;  $\eta = 2$ ;  $\Delta = \pm 0,05$ ;  $C = 8 \mu\text{Ф}$ .

Показатели	Номер схемы рис. 4			
	1	2	3	4
Коэффициент чувствительности при коррекции $\epsilon$ . . . . .	0,9	0,45	0,6	0,9
Чувствительность корректированного вибратора к току $S_k$ в относительных единицах . . . . .	100	50	67	100
Входное сопротивление $z_{ex}$ в относительных единицах . . . . .	100	25	30	86
Чувствительность корректированного вибратора к напряжению $S_{uk}$ в относительных единицах . . . . .	100	200	220	115

Из рассмотрения таблицы следует, что наиболее чувствительными к току являются схемы 1 и 4, к напряжению — схемы 2 и 3. Оптимальные показатели имеет схема 3.

**Экспериментальное исследование.** Автор построил действующие макеты корректирующих приставок ко всем типам вибраторов осциллографа МПО-2 (типы VIII, V, IV, I, II). Каждая приставка может обслуживать любой вибратор своего типа, отвечающий заводским техническим условиям 1952—1953 гг., в рабочем диапазоне температур 10...35°C.

Разброс частотных характеристик вибраторов в серии и их уход при изменении температуры значительны. Количественное представление об этом дает рис. 7, на котором показаны в качестве примера характеристики трех вибраторов типа IV (выпуска 1952 г.) при температурах 9 и 32°C. Нижнюю и верхнюю характеристики в данном семействе, так же как и в аналогичных семействах других типов вибраторов, будем в дальнейшем называть предельными характеристиками.

Для того чтобы любая характеристика вибратора внутри заданных пределов приводилась приблизительно к одной и той же нормальной корректированной характеристике с установленной заранее рабочей полосой частот, — необходима простая и удобная регулировка корректирующей приставки. Указанное требование оказалось настолько существенным, что оно определило выбор корректирующей схемы. Мы выбрали для реализации схему 2. Эта схема регулируется проще всех; наряду с этим, она удобна и в расчетно-конструктивном отношении, так как состоит из наименьшего числа элементов.

Напишем полное уравнение корректированной характеристики для схемы 2 (в безразмерных координатах).

На основании (14), (17) и (6)

$$v_{\omega} = \frac{\sqrt{[1 - CM\omega^2]^2 + \left[\frac{M}{R_1}\omega\right]^2}}{\sqrt{\left[1 - \frac{R_1CL_2}{R_1 + R_2}\omega^2\right]^2 + \left[\frac{R_1R_2C + L_2}{R_1 + R_2}\omega\right]^2}} \times \\ \times \frac{\sqrt{1 + \frac{\alpha^2}{\omega_o^2}\omega^2}}{\sqrt{\left[1 - \frac{1}{\omega_o^2}\omega^2\right]^2 + \left[\frac{2\beta}{\omega_o}\omega\right]^2}}. \quad (24)$$

Предположим, что все элементы схемы рассчитаны по некоторой средней характеристике, заданной параметрами  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $f_o$ . Если после этого характеристика вибратора изменится и ее новыми параметрами будут  $\alpha'$ ,  $\beta'$ ,  $(f_o)'$ , то теоретически для сохранения прежней полосы про-

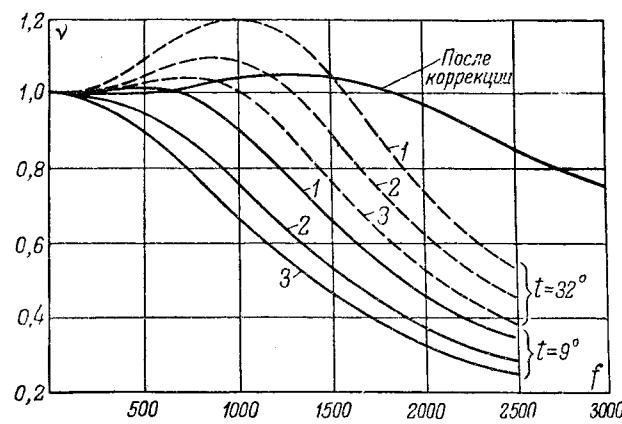


Рис. 7. Амплитудо-частотные характеристики вибратора IV типа.

пускания частот (при прежней амплитудной погрешности) придется изменить все параметры схемных элементов, следуя тому порядку расчета, который выше был описан.

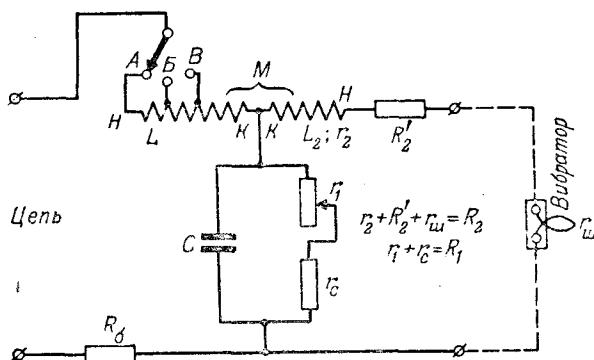
Однако практически достаточно будет отрегулировать (применительно к значениям  $\beta'$ ,  $f'_o$ ) только два схемных элемента  $M$  и  $R_1$ , подобрав их значения таким образом, чтобы числитель первого множителя и знаменатель второго в уравнении (24) были равными.

Детальные расчеты и экспериментальная проверка показывают следующее: 1) регулировка  $R_1$  в узком диапазоне мало отражается на компонентах знаменателя (24), вследствие чего новая и прежняя корректированные характеристики дают почти одинаковую рабочую полосу частот; 2) величину  $M$  можно регулировать не плавно, а ступенями, перекрывая сразу некоторую область значений  $f_o$  [первая формула системы (23)]; 3) с увеличением расчетного значения  $\eta$  входное сопротивление корректирующей приставки при фиксированном  $C$  резко возрастает.

Мы выбрали для окончательного конструктивного оформления макетов  $\eta = 2$ , а количество ступеней регулировки  $M$  свели до трех. Взаимная индуктивность  $M$  реализована в виде катушек на тороиде из альсифера, у которого магнитная проницаемость ( $\mu = 60$ ) практически не изменяется в пределах всего рабочего спектра частот осциллографа и в пределах тех значений намагничивающих ампервитков, на которые рассчитаны катушки  $M$  в корректирующих приставках. Регулируемая часть  $R_1$  выполнена в виде переменного проволочного сопротивления.

Полная схема корректирующей приставки изображена на рис. 8. Соответствующая сводка параметров дана в таблице.

Тип приставки	$C$ , мкФ	$r_1$ , ом	$r_C$ , ом	$R_2$ , ом	$L_2$ , мгн	$L_B$ , мгн	$L_B$ , мгн	$L_A$ , мгн	$R_B$ , ом	$z_{ax}$ , ом
КП-VIII	8	17	30	47	15,0	13,3	18,4	40,0	250	320
КП-V	8	12,5	14	24	2,86	7,62	10,0	16,1	150	170
КП-IV	8	9,5	9,4	15,5	1,68	2,58	3,2	5,7	75	95
КП-I	8	4,5	5,5	7,5	0,68	0,8	1,23	1,95	50	55
КП-II	8	2	2,4	4,8	0,16	0,22	0,25	0,36	25	27



По данным таблицы можно построить любой тип приставки для осциллографа МПО-2.

Эксплуатационные характеристики опытных образцов таковы.

В результате коррекции рабочая полоса частот вибраторов увеличивается при нормальной температуре в 2,5 раза, при предельных температурах в 5...7 раз. При этом имеет место потеря чувствительности в 2...2,5 раза<sup>1</sup>.

На рис. 7 показана примерная корректированная характеристика вибратора IV типа. Видно, что рабочая полоса частот при амплитудной погрешности  $\pm 5\%$  оценивается до коррекции от 300 до 1 200 гц, после коррекции 2 100 гц.

Если теперь сравнить два способа уменьшения динамических погрешностей осциллографа: а) посредством коррекции и б) путем применения более высокочастотного серийного вибратора (без коррекции), то легко убедиться в том, что расширение рабочей полосы частот по второму способу в 5...7 раз сопровождалось бы потерей чувствительности в несколько десятков раз. Следовательно, коррекция дает огромный выигрыш.

В заключение приводим интересную осциллограмму тока сложной формы (рис. 9), записанную тремя последовательно включенными вибраторами при нормальной температуре: 1) вибратором типа I (паспортная частота собственных колебаний в воздухе 5 000 гц); 2) вибратором типа V с корректирующей приставкой; 3) вибратором типа V без коррекции (паспортная частота собственных колебаний в воздухе 2 000 гц).

Отклонение всех трех вибраторов при синусоидальном токе 50 гц было предварительно установ-

<sup>1</sup> К моменту сдачи настоящей статьи автор построил новый макет КП-VIII с увеличением рабочей полосы частот при нормальной температуре в 5 раз.

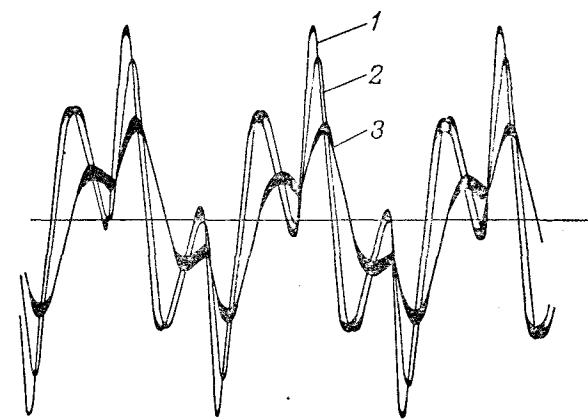


Рис. 9. Запись кривой тока тремя последовательно включенными вибраторами.

лено одинаковым посредством внешних щунтов в цепи. Записывавшаяся кривая имела первую гармонику частоты 500 гц и нечетные гармоники с большими и медленно убывающими амплитудами. Таким образом, все три вибратора давали искаженную запись.

Осциллограмма показывает, что вибратор типа V воспроизвел форму кривой тока намного хуже, чем вибратор типа I. При коррекции качество воспроизведения стало почти одинаковым. Если бы та же осциллограмма была снята при низкой или высокой температуре окружающей среды, то запись вибратора типа I оказалась бы резко ухудшенной, а запись корректированного вибратора типа V (после регулировки КП) практически неизменной.

**Выходы.** Наше исследование позволяет утверждать, что коррекция является весьма эффективным средством для улучшения динамических характеристик вибраторного осциллографа. Технику коррекции необходимо осваивать и широко пользоваться ею в научно-исследовательских работах. Целесообразно и вполне своевременно поставить вопрос о выпуске приборостроительной промышленностью серийных корректирующих приставок, соответствующих серийным типам вибраторов осциллографа.

#### Литература

1. А. А. Харкевич. О расчете одного рода корректирующих схем. Журнал технической физики, т. XVIII, вып. 4, 1947.
2. Р. Р. Харченко. Опытное определение динамических характеристик и конструктивных параметров приборов магнитоэлектрической системы. Электричество, № 4, 1952.

[15. 3. 1954]



# „Скользящий минимум“ при уравновешивании мостов переменного тока с плохой сходимостью

Кандидат техн. наук М. А. БЫКОВ

Московский государственный институт мер и измерительных приборов

Обычно, когда рассматривается задача о сходимости мостов переменного тока, в частности — случай плохой их сходимости [Л. 1, 2, 3], то к исследованию подходит с точки зрения лишь быстроты приведения моста к состоянию равновесия. Однако есть и другая сторона этого вопроса, имеющая не меньшее, — если не большее — практическое значение, а именно: появление в процессе уравновешивания таких мостов ряда ложных минимумов и возможность получения вследствие этого неверных результатов<sup>1</sup>.

Для выяснения рассмотрим вкратце процесс уравновешивания моста переменного тока в случае плохой сходимости этого процесса.

Предположим, что четырехплечий одинарный мост переменного тока, каждое плечо которого состоит из последовательно соединенных активного и реактивного сопротивлений:  $R_1, X_1; R_2, X_2; R_3, X_3; R_4, X_4$  (рис. 1), находится в со-

стоянии, близком к равновесию. В этом случае ток  $i_n$ , протекающий по ветви нулевого прибора, может быть выражен:

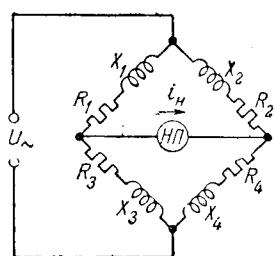


Рис. 1. Мост переменного тока.

стоянии, близком к равновесию. В этом случае ток  $i_n$ , протекающий по ветви нулевого прибора, может быть выражен:

$$i_n = k[R_1R_4 - X_1X_4 - R_2R_3 + X_2X_3 + j(X_1R_4 + X_4R_1 - X_2R_3 - X_3R_2)], \quad (1)$$

где  $k$  — некоторый размерный, в общем случае — комплексный множитель, зависящий от значе-

<sup>1</sup> Очень близко к этому вопросу подходит G. Hoadley [Л. 3], однако специально он его не рассматривает.

ний напряжения источника питания моста и от параметров моста; при неизменном значении напряжения и при малых отклонениях от равновесия этот множитель можно считать постоянным.

Полное равновесие моста ( $i_n = 0$ ), очевидно, имело бы место при одновременном соблюдении двух условий:

$$R_1R_4 - X_1X_4 - R_2R_3 + X_2X_3 = 0 \quad (2a)$$

и

$$X_1R_4 + X_4R_1 - X_2R_3 - X_3R_2 = 0. \quad (2b)$$

В силу необходимости одновременного достижения двух различных условий (2a) и (2b) следует иметь возможность изменять по крайней мере два параметра схемы моста.

Если, например, изменить значение  $X_2$  на  $\Delta X_2$ , то это вызовет изменения тока  $i_n$  на некоторую (комплексную) величину  $\Delta_x i_n$ :

$$\Delta_x i_n = k \cdot \Delta X_2 (X_3 - jR_3). \quad (3a)$$

Очевидно, что  $\Delta_x i_n$ , как и  $i_n$ , можно изобразить некоторым вектором.

Выбирая оси координат так, чтобы вектор, изображающий множитель  $k$ , занимал на векторной диаграмме горизонтальное положение, получаем на диаграмме (рис. 2, a) направление для

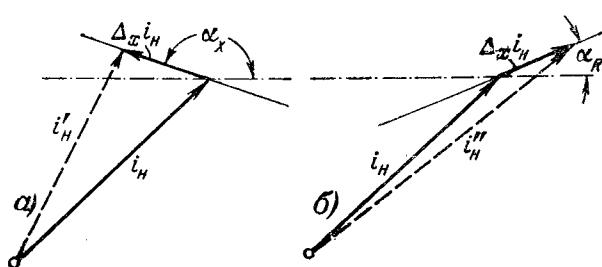


Рис. 2. Изменение тока  $i_n$ .  
a — при изменении  $X_2$  на  $\Delta X_2$ ; б — при изменении  $R_4$  на  $\Delta R_4$ .

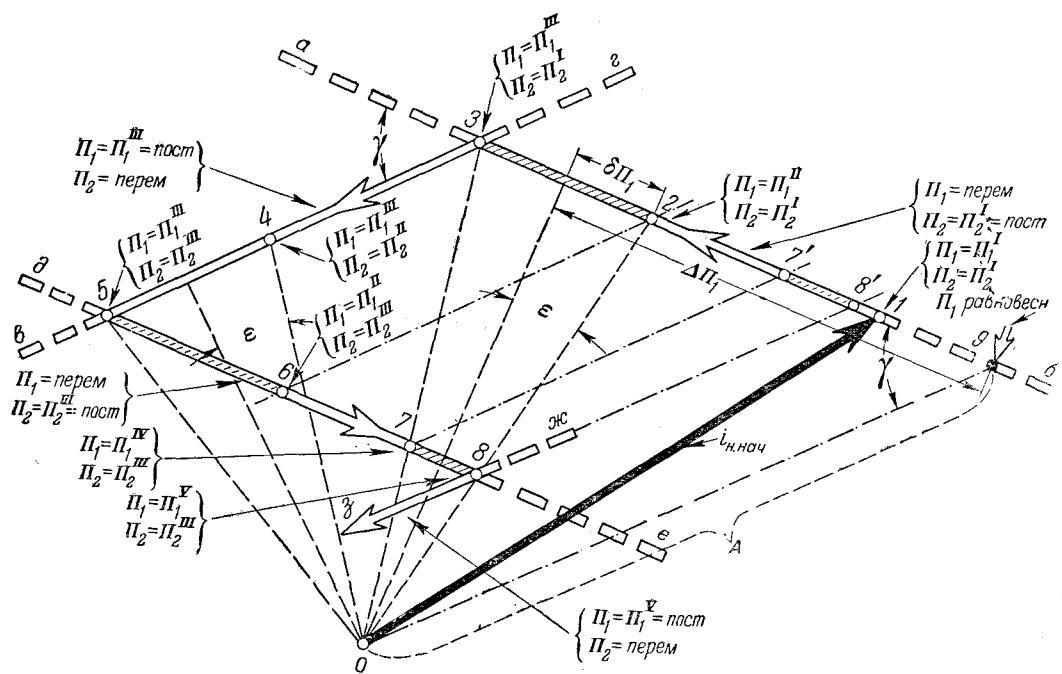


Рис. 3. Диаграмма уравновешивания моста переменного тока.

вектора  $\Delta_x i_n$ , определяемое некоторым углом  $\alpha_x$  к горизонтали, причем

$$\operatorname{tg} \alpha_x = -\frac{R_3}{X_3}.$$

При изменении какого-либо другого параметра схемы моста, например  $R_4$ , изменение тока  $i_n$  (рис. 2,б)

$$\Delta R_4 i_n = k \Delta R_4 (R_1 + jX_1) \quad (36)$$

И

$$\operatorname{tg} \alpha_R = + \frac{X_1}{R_1}.$$

Рассмотрим в общем виде последовательность процесса уравновешивания моста переменного тока путем изменений каких-то двух регулируемых параметров его схемы  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  (рис. 3).

Предположим, что в начале процесса уравновешивания моста ток через нулевой прибор был  $i_{н.нач}$ . Исходя из тех же предпосылок, что и в случаях рис. 2, а и рис. 2, б, ток  $i_{н.нач}$  на рис. 3 изобразим в виде вектора  $O1$ .

Предположим далее, что выбранные нами два регулировочных параметра  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  (например, в приведенном выше примере  $X_2$  и  $R_4$ ) при состоянии моста, характеризуемом точкой  $I$ , имеют частные значения  $\Pi_1^I$  и  $\Pi_2^I$ .

Пусть при регулировке при помощи параметра  $\Pi_1$  линией направления вектора изменения тока через нулевой прибор  $\Delta i_n$ , а также и геометрического места концов вектора самого тока  $i_n$  будет линия  $ab$ . Предположим, что при увеличении параметра  $\Pi_1$  конец вектора  $i_n$  перемещается (рис. 3) влево, а абсолютное значение этого тока начнет уменьшаться, т. е. состояние моста будет приближаться

к равновесию. Однако это уменьшение тока через нулевой прибор будет заметно лишь при перемещении конца этого вектора до некоторой точки 2; при дальнейшем же его перемещении на участке от точки 2 до 3 значение тока  $i_n$  пройдет через свой минимум, но минимум будет столь мало отличаться от значений тока в точках 2 и 3, что он, а вместе с ним и соответствующий ему параметр  $\Pi_1$ , не могут быть установлены сколько-нибудь определенно.

Таким образом, в результате регулировки параметром  $\Pi_1$  в этот раз у наблюдателя остается впечатление, что условия, наиболее близкие к условиям равновесия моста, получаются где-то в области значений параметра  $\Pi_1$  от  $\Pi_1^{II}$  (точка 2) до  $\Pi_1^{III}$  (точка 3) и что эти условия можно определить с точностью примерно до  $\pm \delta \Pi_1$ , где  $\delta \Pi_1 \approx \frac{\Pi_1^{III} - \Pi_1^{II}}{2}$ .

Значение  $\delta\pi_1$  при этом может быть охарактеризовано через некоторый угол  $\epsilon$ . При перемещениях вектора тока  $i_n$  в пределах этого угла  $\epsilon$  изменения абсолютного значения тока уже более неразличимы. Значение угла  $\epsilon$  зависит, во-первых, от свойств применяемого нулевого прибора и, во-вторых, в какой-то мере от навыка и опыта наблюдателя.

Наблюдатель, прекратив уравновешивание моста за счет изменения параметра  $\Pi_1$ , при значении его, скажем,  $\Pi_1^{\text{III}}$  (точка 3), переходит к дальнейшему уравновешиванию моста за счет параметра  $\Pi_2$ .

Пусть  $\vartheta_2$  является линией направления векторов изменений тока через нулевой прибор и геометрическим местом концов вектора самого этого тока при изменениях параметра  $P_2$  и не-

изменном значении  $\Pi_1^{III}$  параметра  $\Pi_1$ . При этом линия  $de$  по отношению к линии  $ab$  находится под углом  $\gamma$ , называемым углом сходимости и являющимся основной характеристикой сходимости процесса уравновешивания моста; этот угол играет существенную роль в тех результатах, к которым мы придем в конце данной работы.

Аналогично предыдущему случаю при регулировке с помощью параметра  $\Pi_2$  наблюдатель приходит к новой области минимальных значений тока  $i_n$  в области значений параметра  $\Pi_2$  от  $\Pi_2^{II}$  до  $\Pi_2^{III}$  (точки 4 и 5).

Для дальнейшего приближения к равновесию необходимо перейти вновь к регулированию с помощью параметра  $\Pi_1$ , прекратив регулирование с помощью параметра  $\Pi_2$  и остановившись, например, в точке 5. Новым геометрическим местом концов вектора тока  $i_n$  теперь будет линия  $de$ , практически параллельная линии первой регулировки параметра  $\Pi_1$  — линии  $ab$ <sup>2</sup>.

Значение параметра  $\Pi_1$ ,  $\Pi_1^{III}$ , оставалось неизменным за время регулировки при помощи параметра  $\Pi_2$ . Однако, если в конце первого уравновешивания при помощи параметра  $\Pi_1$ ,  $\Pi_1^{III}$  было одним из значений в области оптимума этого параметра, и наблюдатель мог ожидать от последующего уравновешивания лишь некоторые уточнения этого результата в пределах области значений от  $\Pi_1^{II}$  до  $\Pi_1^{III}$ , то теперь, возобновив регулировку параметром  $\Pi_1$  с его прежнего значения  $\Pi_1^{III}$ , наблюдатель сейчас же убеждается, что это значение уже к области оптимальных значений никак не относится. В частности, теперь становится очевидным, что в этот раз необходимо изменять параметр  $\Pi_1$  в обратном направлении: для приближения к состоянию равновесия параметр  $\Pi_1$  теперь необходимо изменить от  $\Pi_1^{III}$  (точка 5, соответствующая ей точка 3) к значению  $\Pi_1^{II}$  (точка 6, соответствующая ей точка 2). Но теперь эти значения уже не являются, как в первом случае (точки 3 и 2), границами области минимума; положение минимума теперь находится вне области первого минимума, совершенно при других значениях параметра  $\Pi_1$ , а именно:  $\Pi_1^{IV}$  и  $\Pi_1^{V}$  (точки 7 и 8). Для сравнения на линии  $ab$  нанесены точки 7' и 8', соответствующие тем же значениям параметра  $\Pi_1$ , что и точки 7 и соответственно 8. Что касается окончательного значения параметра  $\Pi_1$ , соответствующего полному равновесию моста, то на диаграмме рис. 3 его можно найти, проведя

через точку  $O$  линию, параллельную линии  $de$ , до пересечения ее с линией  $ab$  в точке 9.

Таким образом, мы видим, что в процессе постепенного уравновешивания моста с углом сходимости  $\gamma$ , существенно отличающимся от  $90^\circ$ , иначе говоря, моста с плохой сходимостью, мы получаем в отношении каждого из его регулировочных элементов ряд различных, следующих последовательно друг за другом, областей оптимальных значений. При этом каждый раз соответствующая область оптимальных значений данного регулировочного параметра обрисовывается, казалось бы, дозорно определенно, и появление при последующем этапе уравновешивания совсем иной области новых оптимальных значений для этого параметра представляется наблюдателю чем-то весьма неожиданным. С другой стороны, появление все новых и новых, все далее и далее перемещающихся областей оптимальных значений регулируемого параметра при проведении ряда последовательных повторных уравновешиваний, обескураживает наблюдателя: где же, в конце концов, „истина“?

Вдобавок, при этом возникает еще одно, до некоторой степени парадоксальное, соотношение: чем более опытен наблюдатель, тем более четко он определяет каждый раз соответствующую область оптимальных значений регулируемого параметра (т. е. достигает меньших значений угла  $\varepsilon$ ), то с тем большей определенностью оказывается совсем иной новая область оптимальных значений этого же параметра при каждом последующем этапе уравновешивания!

В то же время существует определенная практическая вероятность того, что наблюдатель, получив на каком-то этапе уравновешивания „достаточно“ узкую область оптимальных значений регулируемого параметра  $\pm \Delta \Pi_1$ , может принять за действительное „равновесное“ значение параметра среднее его значение в этой области, приняв при этом значение  $\pm \Delta \Pi_1$ , как наибольшую возможную погрешность его определения. Он может даже не подозревать, что это значение, возможно, отличается от настоящего, действительного равновесного регулируемого параметра  $\Pi_{1p}$  на существенно большую величину  $\Delta \Pi_1$ , так как действительное равновесное значение (точка 9 на рис. 3) лежит далеко за пределами данной области оптимальных значений параметра  $\Pi_1$ , получаемой на данном этапе уравновешивания, и находится, казалось бы, в области совершенно „неподходящих“ значений.

Попробуем наметить — хотя бы лишь для самой ориентировочной, приближенной оценки — количественные соотношения между кажущейся степенью определенности нахождения среднего оптимального значения регулируемого параметра при некотором этапе уравновешивания  $\Delta \Pi_1$  и действительной погрешностью  $\Delta \Pi_1$ , которая будет допущена, если окончить уравновешивание на этом этапе, а за действительное равновесное значение параметра  $\Pi_1$  принять его среднее значение в полученной при этом

<sup>2</sup> Что линия  $de$  будет примерно параллельна линии  $ab$ , следует из того, что принципиально выражение для тангенса угла наклона каждой из них одно и то же, числовые же значения параметров моста, входящие в это выражение, при переходе от первого случая ко второму могут измениться лишь весьма незначительно.

этапе уравновешивания моста области оптимальных значений.

Из рис. 3 видно, что

$$\delta\Pi_1 = A \sin \gamma \operatorname{tg} \varepsilon,$$

а

$$\Delta\Pi_1 = A \cos \gamma,$$

отсюда

$$\Delta\Pi_1 = \delta\Pi_1 \operatorname{ctg} \gamma \operatorname{ctg} \varepsilon.$$

Обычно в среднем  $\varepsilon = 10 \dots 20^\circ$ . Получаем:

$$\Delta\Pi_1 = \delta\Pi_1 \operatorname{ctg} \gamma (3 \dots 5).$$

Следовательно, даже при  $\gamma$ , равном только  $45^\circ$  (случай не очень плохой сходимости), наблюдатель может получить в своих измерениях погрешность, уже в несколько раз большую, чем он это предполагает.

При еще меньших углах сходимости положение быстро ухудшается, и единственным положительным обстоятельством здесь является лишь то, что при существенно меньших значениях  $\gamma$  ( $15 \dots 20^\circ$ ) уравновешивание моста становится само по себе невыполнимым (если говорить о закономерном приближении к состоянию равновесия моста).

Из приведенного выше рассмотрения явления "скользящего минимума" при уравновешивании мостов переменного тока с плохой сходимостью можно сделать следующие выводы:

1. Нельзя дать надежного, удобного и субъективного критерия количественной оценки совершающей ошибки  $\Delta\Pi$ , так значения  $\varepsilon$  весьма

субъективны, а подсчеты значения  $\gamma$  часто весьма затруднительны. Поэтому следует всемерно избегать вообще применения мостов с плохой сходимостью. В частности, приборостроительная промышленность должна отказаться от выпуска и тем более от разработки таких новых видов мостов переменного тока, которые обладают плохой сходимостью<sup>3</sup>.

2. В случае применения в отдельных случаях мостов переменного тока с плохой сходимостью, уравновешивая такой мост, следует оканчивать процесс уравновешивания лишь тогда, когда ширина области оптимальных значений регулируемого искомого параметра станет в  $5 \dots 10$  раз меньше, чем допустимая для данного измерения погрешность определения этого параметра.

#### Литература

1. К. Б. Карапеев. Мостовые методы измерений Укр. Гос. Тех. издат, Киев, 1953.

2. K. Kürpfmüller. Über die Konvergenz der Brückmessverfahren. E. u. M., № 14/15, 1933.

3 G. Headley. The science of balancing and impedance bridge. Journ. of the Franklin Institute, т. 228, № 6, декабрь 1939.

[30. 12. 1953]

<sup>3</sup> По крайней мере в случае использования в таких мостах фазонечувствительных нулевых индикаторов.



# Основные уравнения дифференциальных насыщающихся трансформаторов тока для релейной защиты

Кандидат техн. наук, доц. А. Д. ДРОЗДОВ

Новочеркасский политехнический институт им. Орджоникидзе

Принципиальные схемы использования насыщающихся трансформаторов тока с подмагничиванием в релейной защите показаны на рис. 1. Дифференциальная защита, выполненная при помощи насыщающегося трансформатора тока с двойным сердечником, дана на рис. 1, а. Для удобства оба сердечника можно рассматривать как один

трансформатор. Ток дифференциальной цепи защиты является первичным током трансформатора. Этот ток трансформируется из обмотки  $w_d$  во вторичную обмотку  $w_2$ , одновременно ток  $0,5I_1$  также трансформируется в  $w_2$ . Следовательно,  $w_d$  и, частично,  $w_n$  играют роль первичной обмотки, эквивалентное число витков которой  $w_1 = w_d + 0,5w_n$ . При внешнем повреждении возникает большой ток  $I_n$ , проходящий по обмоткам  $w_n$  и подмагничивающий сердечники. Этот ток не наводит э. д. с. во вторичной цепи, но насыщает сердечники, ухудшая тем самым условия трансформации тока  $I_1$ . Получающийся эффект можно сравнить с торможением в дифференциальной защите.

На рис. 1, б показано подмагничивание, выполненное при помощи постоянного тока. Для сглаживания пульсаций подмагничивающего поля (в целях уничтожения зависимости работы реле от угла  $\phi$  между токами  $I_1$  и  $I_n$ ) применены короткозамкнутые обмотки. На рис. 1, в показана балансная защита. Здесь применено иное расположение обмоток, которое, как показано далее, дает лучшие характеристики.

Проанализируем работу насыщающегося трансформатора с подмагничиванием (рис. 2).

Насыщающиеся трансформаторы тока, подмагничиваемые переменным или постоянным током, с подключенным к их вторичным обмоткам электромагнитными реле могут заменить дифференциальные реле с двумя механическими моментами, направленными в разные стороны. Такие трансформаторы предназначаются для дифференциальной, балансной, дистанционных защит и для автоматики. Теоретический анализ, проведенный на основе идеализированного и уточненного аппроксимирования кривой намагничивания стали, позволил выявить основные свойства и установить оптимальную индукцию трансформаторов. Характеристики срабатывания реле в виде кривых двойного намагничивания дают возможность производить расчет трансформаторов.

Разность намагничающих сил первичной и вторичной обмоток создает рабочие потоки  $\Phi_p$ , направленные в одну сторону. Подмагничающие или тормозящие обмотки создают потоки  $\Phi_n$ , направленные в разные стороны. При подмагничивании увеличивается первичный ток срабатывания:  $I_1 = I_c > I_{c0}$ , где  $I_{c0}$  —

начальный или минимальный ток срабатывания при отсутствии подмагничивания.

К сбомткам трансформатора подводятся синусоидальные токи, но напряжение на зажимах реле несинусоидально. Рассмотрим работу реле, реагирующего на первую гармонику вторичного напряжения, а следовательно, и потока. Исследования показывают, что такое реле дает хорошие результаты. Выполнить его можно при помощи специального фильтра. Но на практике достаточную отстройку от высших гармоник дает реле ЭТ521/0,2 без фильтра, что подтверждается характеристиками, приведенными далее. Большая индуктивность сбомток этого реле ограничивает высшие гармонические, и среднеквадратичное значение общего тока мало отличается от тока первой гармоники. На основании этого дальнейшие выводы справедливы для обычных реле. Все обозначения далее будут от-

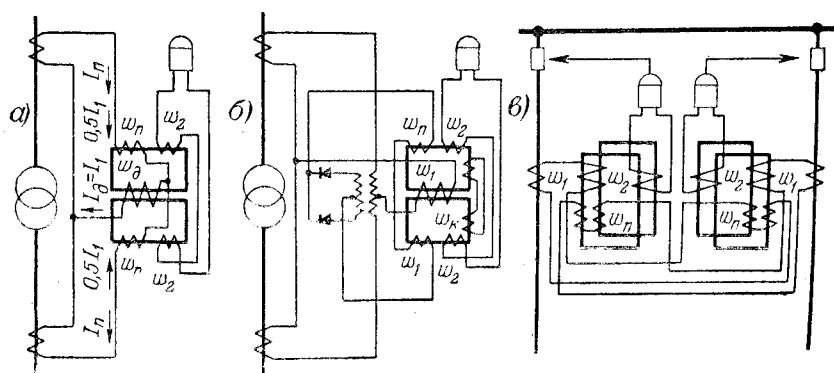


Рис. 1. Принципиальные схемы использования насыщающихся трансформаторов с подмагничиванием.

*a* — дифференциальная защита с подмагничиванием на переменном токе; *b* — то же, с подмагничиванием на постоянном токе; *c* — балансная защита параллельных линий

<sup>1</sup> В статье приняты индексы:  $d$  — дифференциальный;  $n$  — подмагничивающий;  $p$  — рабочий;  $c$  — срабатывания;  $0$  — начальный.

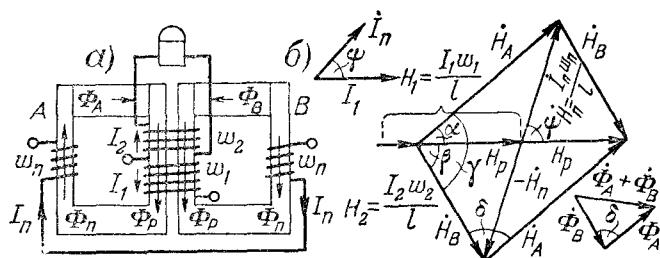


Рис. 2. Принципиальная схема трансформатора с подмагничиванием и его векторная диаграмма.

носится к первой гармонической. При высоких индукциях ток активных потерь в стали имеет малое относительное значение, поэтому приближенно можно заменить первую гармонику индукции аналитическим выражением:

$$B = \frac{2B_m}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{H}{H_b}, \text{ или } B_* = \frac{B}{B_m} = \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} H_*, \quad (1)$$

где  $B_m$  — максимальная индукция насыщения при  $H \rightarrow \infty$ . Для трансформаторной стали  $B_m \approx 2\vartheta \cdot \text{сек}/m^2$ ;  $H_b$  — базисная напряженность магнитного поля, соответствующая  $B = 0,5_m$  (рис. 3). В последнем легко убедиться, если в (1) подставить  $H = H_b$ . Второе уравнение выражено в относительных единицах. За базисные величины  $B$  и  $H$  приняты  $H_b$  и  $B_m$ .

На рис. 2, а сумма магнитных потоков  $\Phi_A$  и  $\Phi_B$  двух сердечников наводит э. д. с. во вторичной обмотке. При действии защиты эта э. д. с. равна напряжению срабатывания реле  $U_c$ . Следовательно, условие срабатывания:

$$|\Phi_A + \Phi_B| = \frac{U_c}{4,44 \cdot f \cdot w_2} = 2QB_c, \quad (2)$$

где  $Q$  — сечение одного сердечника.

На рис. 2, б приведена векторная диаграмма трансформатора без рассеяния. Так как индуктивность обмоток реле большая, то можно приближенно считать, что первый, второй и намагничивающий токи совпадают по фазе. Если расположить эти токи по оси действительных величин, то напряженности рабочего и подмагничивающего полей будут:

$$H_p = H_1 - H_2 = \frac{I_1 w_1}{l} - \frac{I_2 w_2}{l},$$

$$\dot{H}_n = \frac{I_n w_n}{l}, \quad \psi = \dot{H}_n \dot{H}_1 = \dot{I}_n I_1, \quad (3)$$

Напряженности поля правого и левого сердечников:

$$\dot{H}_A = H_p + \dot{H}_n, \quad \dot{H}_B = H_p - \dot{H}_n,$$

$$\gamma = \dot{H}_A \dot{H}_B = B_A B_B, \quad \delta = \pi - \gamma. \quad (4)$$

Введем, кроме того, относительные величины:

$$H_{*p} = \frac{H_p}{H_b}, \quad H_{*n} = \frac{H_n}{H_b}, \quad H_{*A} = \frac{H_A}{H_b},$$

$$H_{*B} = \frac{H_B}{H_b}, \quad B_{*c} = \frac{B_c}{B_m}. \quad (5)$$

На основании рис. 2, б, с учетом (1), (4), (5), уравнению (2) можно придать вид:

$$(\operatorname{arctg} H_{*A})^2 - 2 \operatorname{arctg} H_{*A} \operatorname{arctg} H_{*B} \cos \delta +$$

$$+ (\operatorname{arctg} H_{*B})^2 = \pi^2 B_{*c}^2. \quad (6)$$

Это уравнение позволяет аналитически получить характеристики двойного намагничивания стали при переменном токе  $H_p = f(H_n)$ , которые характеризуют условия срабатывания реле. Для каждой характеристики примем  $B_c = \text{пост}$ . В таком виде они наиболее полно отражают работу защиты, так как реле срабатывает при постоянном  $U_c$  и  $B_c$ . Напряженности магнитного поля пропорциональны токам, поэтому кривые двойного намагничивания одновременно в некотором масштабе являются характеристиками защиты.

Вначале для упрощения идеализируем кривую намагничивания стали и заменим ее двумя прямыми, параллельными осям абсцисс:  $B = \pm B_m$  (рис. 3). Если обратиться к уравнению (1), то оно будет выражать идеализированную кривую при  $H_b \rightarrow 0$ , что наглядно видно из рис. 3. Если в (6) положить  $H_b \rightarrow 0$  или, что то же самое,  $H_{*A} \rightarrow \infty$  и  $H_{*B} \rightarrow \infty$ , то при переходе к пределу, т. е. к идеализированной кривой, получим уравнение работы реле:

$$\sin \frac{\delta}{2} = \frac{B_c}{B_m} = B_{*c}, \quad (7)$$

где  $\delta = 180^\circ - \gamma$ .

Следовательно, реле работает при постоянном значении угла  $\delta$ . На основе рис. 2, б, применяя обобщенную теорему Пифагора, можно получить квадратное уравнение:

$$H_p^2 - 2H_p H_n \operatorname{cosec} \delta \sqrt{1 - \cos^2 \delta \cos^2 \gamma} +$$

$$+ H_n^2 = 0.$$

Решение этого уравнения дает идеализированную характеристику двойного намагничивания:

$$H_p = H_n \operatorname{ctg} \delta (\sqrt{\operatorname{tg}^2 \delta + \sin^2 \gamma} \mp \sin \gamma), \quad (8)$$

где  $\delta = \arcsin B_{*c} = \text{пост}$ .

Анализ и построение кривых на основе этого уравнения следует производить при различных значениях угла  $\psi$ . Наиболее характерные случаи:  $\psi = 0$  и  $90^\circ$ . Вследствие симметричности схемы рис. 2 характеристики при  $\psi = 0$  и  $\psi = 180^\circ$ , а также при  $\psi = 90^\circ$  и  $\psi = -90^\circ$  совпадают.

Рассмотрим случай  $\psi = 0$ . На основании (7) угол  $\delta = \text{пост}$ . Тогда из уравнения (8) получим идеализированную характеристику двойного на-

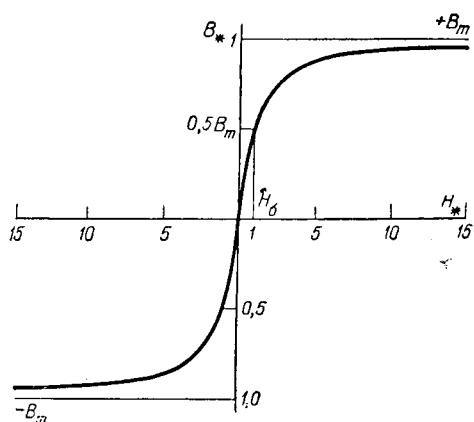


Рис. 3. Кривая намагничивания трансформаторной стали в относительных единицах, построенная по уравнению  $B_* = \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} H_*$  и идеализированная кривая  $B = \pm B_m$ .

магничивания или, другими словами, уравнение срабатывания реле:

$$H_p = H_n \text{ при } \psi = 0 \quad (9)$$

Это равенство не зависит от  $\delta$ , следовательно, наклон характеристики (равный  $45^\circ$ ) не зависит от выбранной индукции (7) и напряжения срабатывания реле (2). Прямая, соответствующая (9), показана на рис. 4,а сплошной линией<sup>2</sup>.

При больших токах действия защиты характеризуется коэффициентом подмагничивания  $k_n = \frac{I_c}{I_n}$ . Его можно выразить через напряженности. Если пренебречь  $H_2$ , то с учетом (9) получим:

$$k_n = \frac{I_c}{I_n} = \frac{(H_p + H_2)t}{w_1} \frac{w_n}{H_n t} \approx \frac{w_n}{w_1}. \quad (10)$$

Другой характерный случай  $\psi = 90^\circ$ . С учетом (7) уравнение (8) при отрицательном знаке для  $\sin \psi$  дает идеализированную характеристику двойного намагничивания:

$$H_p = H_n \operatorname{tg} \frac{\delta}{2} = \sqrt{\left(\frac{B_m}{B_c}\right)^2 - 1} \quad \text{при } \psi = 90^\circ. \quad (11)$$

Прямые для этого случая показаны на рис. 4,а пунктиром. С увеличением  $B_c$  повышается наклон характеристик. Если  $B_c = B_m / \sqrt{2}$ , что на основании (7) соответствует  $\delta = 90^\circ$ , то характеристика (11) совпадает с (9), что видно и на рис. 4,а. Нетрудно показать, что при  $\delta = 90^\circ$  выражение (8) превращается в  $H_p = H_n$  при любых значениях угла  $\psi$ . Следовательно, в этом случае исчезает зависимость работы защиты от угла между токами. Если  $\delta \neq 90^\circ$ , то характе-

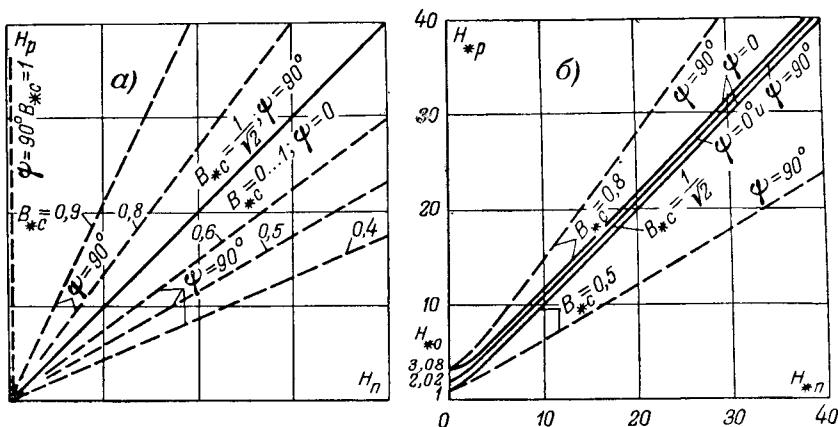


Рис. 4. Кривые двойного намагничивания.  
а — идеализированные, построенные по уравнению  $B = \pm B_m$ ; б — построенные по уравнению  $B_* = \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} H_*$ .

ристики при  $0^\circ < \psi < 90^\circ$  лежат между предельными уравнениями (9) и (11), а кривые на рис. 4,а между пунктирными и сплошными линиями при соответствующих индукциях.

Если учесть положительный знак в (8), то будем иметь:

$$H_p = H_n \operatorname{ctg} \frac{\delta}{2} = H_n \sqrt{\left(\frac{B_m}{B_c}\right)^2 - 1}.$$

При увеличении  $U_c$  и  $B_c$ ,  $H_p$ , а следовательно, и ток срабатывания уменьшаются, что противоречит физическому смыслу. Поэтому учитываем лишь отрицательный знак в (8).

Выведем более точные выражения для характеристик двойного намагничивания.

При  $\psi = 0$  угол  $\delta = 180^\circ$  и на основе (6) с учетом (4) уточненная характеристика двойного намагничивания будет:

$$H_{*p} = -\operatorname{ctg}(\pi B_{*c}) \pm \sqrt{\operatorname{ctg}^2(\pi B_{*c}) + 1 + H_{*n}} \quad (12)$$

при  $\psi = 0^\circ$ .

Смысл имеет лишь положительное значение радикала.

Введем понятие начальной напряженности рабочего магнитного поля, которая создается начальным током срабатывания  $I_{c0}$  при отсутствии подмагничивания. Определим ее из (12):

$$H_{*p0} = \frac{H_{p0}}{H_6} = \operatorname{tg} \frac{\pi B_{*c}}{2} \quad \text{при } H_n = 0. \quad (13)$$

Эта величина характеризует положение движка реле. Если в (12) подставить выражение котангенса двойного угла и учесть (13), то получим уточненную характеристику двойного намагничивания в другом виде:

$$H_{*p} = \frac{H_{*p0}^2 - 1}{2H_{*p0}} + \sqrt{\left(\frac{H_{*p0}^2 + 1}{2H_{*p0}}\right)^2 + H_{*n}^2} \quad \text{при } \psi = 0^\circ. \quad (14)$$

<sup>2</sup> На рис. 4 и везде напряженность поля дана в эффективных значениях..

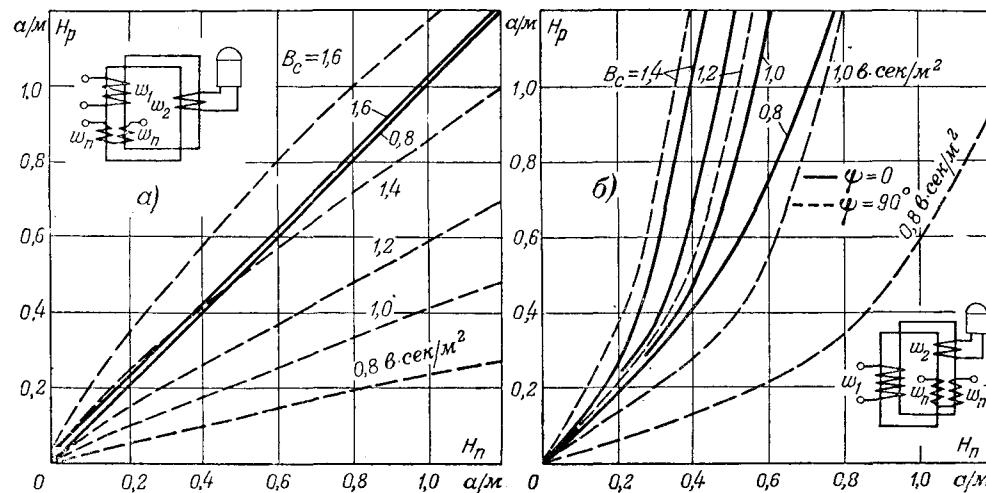


Рис. 5. Кривые двойного намагничивания трансформаторной стали для схем.  
а —  $k_n = \text{пост}$ ; б — увеличивающийся коэффициент  $k_n$ .

Это уравнение гиперболы с асимптотой:

$$H_{*p} = \frac{H_{*p0}^2 - 1}{2H_{*p0}} + H_{*n}. \quad (15)$$

Если уравнение (12) или (14) умножить на  $H_b$ , а затем считать  $H_b \rightarrow 0$ , то при переходе к пределу получим идеализированную характеристику (9). Кривые, построенные по уравнению (14), показаны на рис. 4,б сплошными. Наклон их  $45^\circ$  и не зависит от  $B_c$  и  $U_c$ . Следовательно, изменение уставки реле влияет лишь на  $H_{p0}$  или на начальный ток срабатывания защиты, но не изменяет наклона характеристик при  $\phi = 0$ . Все это свидетельствует о том, что при больших токах постоянными членами в уравнении (14) можно пренебречь, поэтому приближенно коэффициент подмагничивания выражается отношением (10).

При  $\phi = 90^\circ$  напряженность  $\dot{H}_n = H_n \angle 90^\circ$ . На основании рис. 2,б и уравнений (4) результирующие напряженности сердечников в этом случае являются сопряженными комплексами:

$$\begin{aligned} \dot{H}_A &= \dot{H}_B = (\sqrt{H_p^2 + H_n^2}) \angle 0,5\gamma; \\ H_A &= H_B; \quad \sin \frac{\delta}{2} = \frac{H_p}{H_n}. \end{aligned} \quad (16)$$

Подстановка этих соотношений в (6) дает уточненную характеристику двойного намагничивания:

$$H_{*r} = H_{*A} \frac{\pi B_{*c}}{2 \arctg H_{*A}}; \quad H_{*n} = \sqrt{H_{*A}^2 - H_{*r}^2}$$

при  $\phi = 90^\circ$ . (17)

Для получения точек кривой  $H_p = f(H_n)$  вначале задаемся произвольным значением  $H_{*A}$ , затем по (17) вычисляем  $H_{*r}$  и  $H_{*n}$ . Полученные, таким образом, кривые показаны на рис. 4,б пунктиром. Чем больше  $B_{*c}$ , тем больше наклон

кривых. При  $B_{*c} = \frac{1}{\sqrt{2}}$  кривые при  $\phi = 90^\circ$  и

$\phi = 0$  практически совпадают. Наклон кривых на рис. 4,б равен наклону идеализированных кривых на рис. 4,а. Поэтому все выводы, сделанные ранее, справедливы и для уточненных кривых. Если в (17) предположить  $H_b \rightarrow 0$  и перейти к пределу, то из уточненной получим идеализированную характеристику (11).

Все теоретические положения были подтверждены опытами, проведенными автором совместно с В. В. Михайловым. Для получения характеристик срабатывания реле в виде кривых двойного намагничивания была собрана схема с двумя сердечниками из отожженной трансформаторной стали, показанная на рис. 5,а. Для уничтожения влияния потока рассеяния вторичная обмотка наматывалась на отдельный стержень. Кривые двойного намагничивания, полученные при помощи реле ЭТ521/0,2, приведены на рис. 5,а. Эти характеристики аналогичны теоретическим и подтверждают все сделанные выводы.

Подобные кривые были получены при помощи ваттметра, токовая катушка которого питалась синусоидальным током от фазорегулятора. Ваттметр реагировал на первую гармонику напряжения. Полученные таким путем кривые отличаются от кривых рис. 5,а не более чем на 15 %. Это подтверждает, что реле ЭТ521/0,2 реагирует с достаточной точностью на первую гармонику напряжения.

Рассмотрим работу реле с большим активным сопротивлением, которое реагирует на высшие гармонические напряжения. При  $\phi = 90^\circ$ , по мере увеличения первичного тока, угол  $\delta$  между потоками первой гармоники сердечников на рис. 2 растет, начиная с нуля. Уже при небольшом первичном токе этот угол может достичь  $36^\circ$  и особенно резко выраженные потоки пятой гармоники будут совпадать по фазе, что приведет к срабатыванию реле. То же самое относится и к другим высшим гармоникам. Благодаря этому

при  $\psi = 90^\circ$  реле обладает большой чувствительностью, т. е. кривые двойного намагничивания при  $\psi = 90^\circ$  идут значительно ниже, чем при  $\psi = 0^\circ$ , что подтверждается опытом. Поэтому реле с активным сопротивлением применять нельзя.

Для схемы рис. 5, а характеристики прямолинейны и коэффициент подмагничивания  $k_n = \text{пост.}$  По этой схеме могут выполняться реле для защиты параллельных линий (балансного типа, рис. 1, б).

Если вторичную обмотку разместить вместе с подмагничивающими (рис. 5, б), то их действие усиливается при больших токах за счет потока рассеяния. Наклон кривых и коэффициент подмагничивания будет возрастать одновременно с током. Такие характеристики желательны для дифференциальных защит (рис. 1, а). Если  $B_c \approx 1,3 \frac{\text{в.сек}}{\text{м}^2}$ , то характеристики при  $\psi = 0$  и  $90^\circ$  практически совпадают.

В случае размещения вторичной обмотки совместно с первичной (рис. 6) при больших токах поток рассеяния будет увеличивать чувствительность защиты, а наклон характеристик и коэффициент подмагничивания уменьшать. Для сравнения на рис. 6 приведены кривые для всех трех видов схем. В зависимости от требований к характеристикам можно применять ту или иную схему.

В ряде защит применяется подмагничивание выпрямленным током (рис. 1, б). Сделанные выводы справедливы и для этого случая. Кривые двойного намагничивания, полученные при постоянном подмагничивающем токе, для трех видов схем показаны на рис. 7.

Начальные ординаты на рис. 5 ... 7 малы, поэтому для расчета трансформатора следует иметь дополнительно кривую намагничивания стали (рис. 8), полученную при помощи реле, проградуированного при синусоидальном напряжении. Напряженность поля вычислялась по формуле (3).

Значительное влияние на намагничающий ток оказывает сжатие сердечника (рис. 8). Даже легкое равномерное сжатие ( $20 \text{ кг}$ ) увеличивает ток намагничивания на 25%; сильное сжатие — на 50%. Особенно резко влияет сжатие с изгибом. Поэтому следует избегать сжатия сердечника.

Все схемы можно собрать и на одном трехстержневом сердечнике (например, рис. 8). В этом случае кривые двойного намагничивания характеризуют процесс лишь в крайних стержнях. По среднему стержню проходит либо один рабочий (рис. 8), либо один подмагничающий поток. В первом случае (рис. 8) при расчете трансформатора намагничающую силу среднего стержня следует считать постоянной, соответствующей  $B_c$ . Во втором случае средний стержень насыщается меньше крайних и его магнитным сопротивлением можно пренебречь. Тогда длина силовой линии подмагничающего

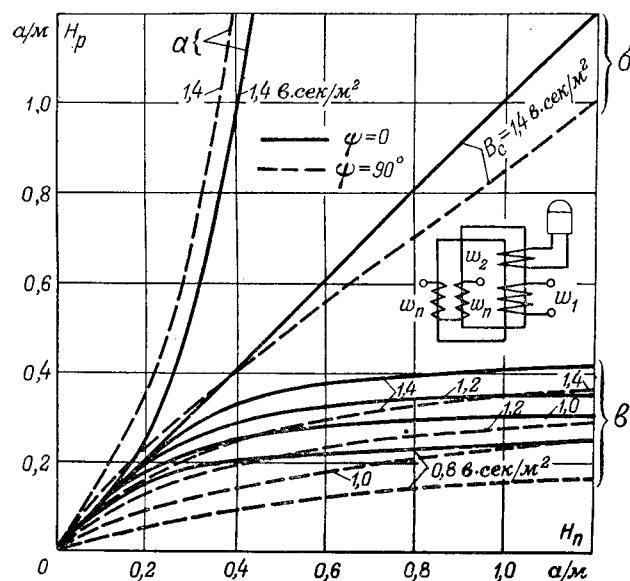


Рис. 6. Кривые двойного намагничивания трансформаторной стали для схем.  
а —  $k_n = \text{пост.}$ ; б — коэффициент  $k_n$  увеличивается; в —  $k_n$  уменьшается.

поля, как и рабочего, будет определяться только крайними стержнями с ярмом. Опыт показывает, что при этом погрешность весьма незначительна. Следовательно, кривые рис. 5, 6, 7 являются универсальными.

Рассмотрим на примере использование кривых двойного намагничивания для расчета параметров дифференциальной защиты двухобмоточного трансформатора, выполненной по рис. 5, б. Выберем параметры реле:  $U_c = 0,7 \text{ в}$ ,  $I_2 = 0,12 \text{ а}$ ;  $S_c = 0,084 \text{ ва}$ . Для того чтобы ток срабатывания защиты значительно изменялся при подмагни-

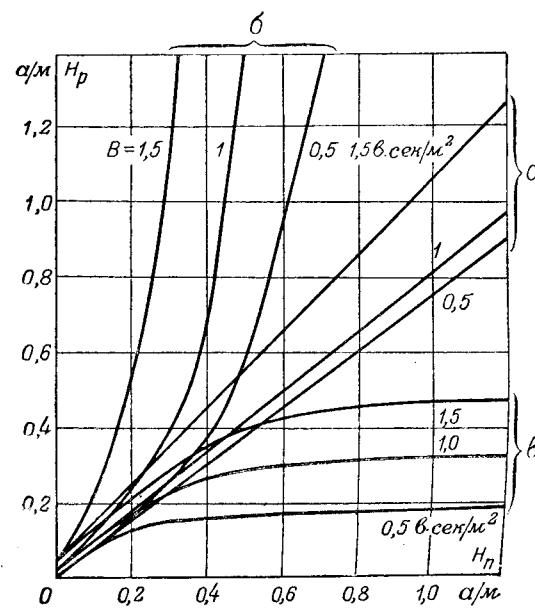


Рис. 7. Кривые двойного намагничивания трансформаторной стали при постоянном подмагничающем токе, снятые на двухстержневых сердечниках для схем:  
а —  $k_n = \text{пост.}$ ; б — удаляющийся  $k_n$ ; в — уменьшающийся  $k_n$ .

чивании, выберем небольшую относительную мощность реле  $\alpha_p = 0,09$ , на основе чего определим мощность намагничивания сердечника  $S_{ho}$ :

$$\alpha_p = \frac{S_c}{S_{ho} + S_c} = 0,09, \quad S_{ho} = \frac{1 - \alpha_p}{\alpha_p} S_c = 0,85 \text{ вт.}$$

Выберем рабочую индукцию  $B_c = 1,3 \frac{\text{в.сек}}{\text{м}^2}$ .

На основании рис. 8 начальная напряженность поля  $H_{po} = 150 \text{ а/м}$ . Объем сердечника:

$$V = \frac{S_{ho}}{4,44 \cdot f B_c H_{po}} = \frac{0,85 \cdot 10^6}{222 \cdot 1,3 \cdot 150} = 19,5 \text{ см}^3.$$

Сердечник с данным объемом показан на рис. 9. Длина силовой линии  $l = 18 \text{ см}$ . Сечение одного сердечника  $0,525 \text{ см}^2$ . Число витков вторичной и первичной обмоток при начальном токе срабатывания зазоры  $I_{co} = 2,5 \text{ а}$ :

$$w_2 = \frac{U_c}{222 B_c 2Q} = \frac{0,7 \cdot 10^4}{222 \cdot 1,3 \cdot 1,05} = 23;$$

$$w_1 = \frac{H_{po} l + I_2 w_2}{I_{co}} = \frac{1,5 \cdot 18 + 0,12 \cdot 23}{2,5} = 12.$$

Выберем при сквозном токе  $I_n = 70 \text{ а}$  коэффициент подмагничивания  $k_n = \frac{I_c}{I_n} = 0,5$ , тогда

$I_c = 35 \text{ а}$  и соответствующая напряженность рабочего потока:

$$H_p = \frac{I_c w_1 - I_2 w_2}{l} = \frac{35 \cdot 12 - 0,12 \cdot 23}{18} = 23,2 \text{ а/см.}$$

На основании рис. 5,б находим необходимую напряженность подмагничивающего поля

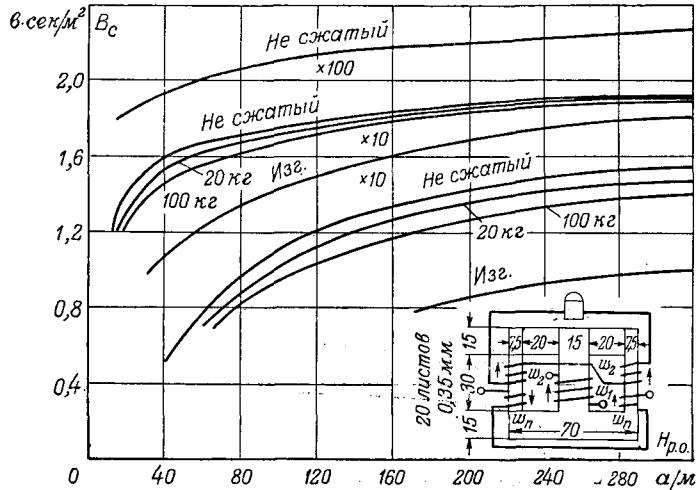


Рис. 8. Кривые намагничивания отожженой трансформаторной стали, снятые с помощью реле, при различном сжатии боковых частей сердечника (изг — соответствует сжатию пластин с изгибом 4 мм).

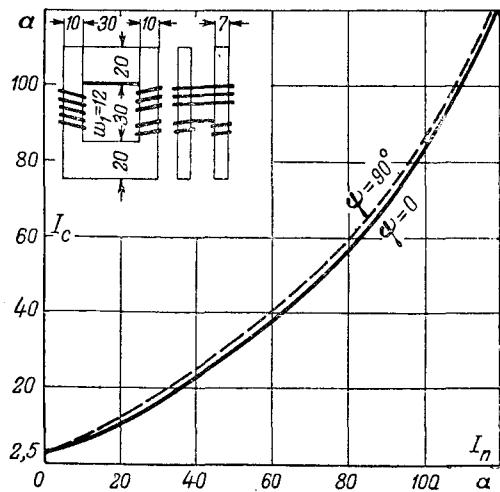


Рис. 9. Параметры и характеристики реле с двойным сердечником.

$H_n = 21 \text{ а/см}$ . Число витков каждой подмагничивающей обмотки

$$w_n = \frac{H_n l}{I_n} = \frac{21 \cdot 18}{70} \approx 6.$$

Кривые рис. 5,б при  $B_c = 1,3$  являются в некотором масштабе характеристиками рассчитанного реле. Выразим токи через напряженности поля:

$$I_c = \frac{H_p l + I_2 w_2}{w_1} = 1,5 H_p + 0,23; \quad I_n \frac{H_n l}{w_n} = 3 H_n.$$

Эти соотношения и характеризуют масштабы для тока небаланса и сквозного тока. Трансформатор со всеми параметрами и опытные характеристики показаны на рис. 9.

Рассмотрим расчет трансформатора с трехстержневым сердечником, показанным на рис. 8. Параметры реле взьмем из предыдущего примера. Для того чтобы ток срабатывания защиты значительно менялся при подмагничивании, выберем мощность намагничивания крайних стержней и ярма сердечника значительно большее мощности реле:  $S_{ho} = 0,55 \text{ вт}$ . Относительная мощность реле

$$\alpha_p = \frac{S_c}{S_{ho} + S_c} = \frac{0,034}{0,55 + 0,034} = 0,13.$$

Выберем рабочую индукцию  $B_c = 1,35 \frac{\text{в.сек}}{\text{м}^2}$ . На основe рис. 8 начальная напряженность поля  $H_{po} = 1,7 \text{ а/см}$ . Объем крайних стержней и ярма, подвергающихся подмагничиванию:

$$V = \frac{S_{ho}}{222 B_c H_{po}} = \frac{0,55 \cdot 10^6}{222 \cdot 1,35 \cdot 1,7} = 10,5 \text{ см}^3.$$

Сердечник с этим объемом показан на рис. 8. Длина рабочей силовой линии  $l_p = 14,5 \text{ см}$ , сечение крайних стержней  $Q = 0,075 \cdot 0,035 \cdot 20 = 0,525 \text{ см}^2$ . Число витков вторичной и первич-

ной сбомоток при начальном токе срабатывания  $I_c = 2,5 \text{ а}$ :

$$w_2 = \frac{U_c}{222B_c 2Q} = \frac{0,7 \cdot 10^4}{222 \cdot 1,35 \cdot 1,05} = 22;$$

$$w_1 = \frac{H_{fo}I_p + I_2w_2}{I_{co}} = \frac{1,7 \cdot 14,5 + 0,12 \cdot 22}{2,5} = 11.$$

Вследствие того, что реле срабатывает при постоянном напряжении, индукция в среднем стержне не меняется. Длина его силовой линии  $l_c = 4,5 \text{ см}$ . Намагничивающая сила среднего стержня

$$F_c = l_c H_{po} = 4,5 \cdot 1,7 = 7,54 \text{ а.}$$

Выберем коэффициент подмагничивания  $k_n = \frac{l_c}{l_n} = 0,5$  при сквозном токе  $I_n = 70 \text{ а}$ , тогда  $I_c = 35 \text{ а}$  и соответствующая напряженность рабочего поля в крайних стержнях:

$$H_p = \frac{I_c w_1 - F_c - I_2 w_2}{l_p - l_c} = \frac{35 \cdot 11 - 7,54 - 0,12 \cdot 22}{14,5 - 4,5} = 37,5 \text{ а/см.}$$

На основании рис. 5,б находим необходимую напряженность подмагничивания  $H_n = 28 \text{ а/см}$ . Число витков каждой подмагничивающей обмотки:

$$w_n = \frac{H_n(l_p - l_c)}{I_n} = \frac{28(14,5 - 4,5)}{70} = 4.$$

Кривые рис. 5,б при  $B_c = 1,35$  являются характеристиками рассчитанного реле, действительно:

$$I_c = \frac{H_p(l_p - l_c) + F_c + I_2 w_2}{w_1} = 0,91 H_p + 0,925;$$

$$I_n = \frac{H_n(l_p - l_c)}{w_n} = 2,5 H_n.$$

Это и будут масштабы для тока срабатывания и сквозного тока на рис. 5,б. Схема рассчитанного трансформатора показана на рис. 8. Трансформатор был выполнен, и его характеристики близко совпали с теоретическими.

**Заключение.** Основные уравнения и характеристики двойного намагничивания, полученные аналитическим путем, позволяют изучить работу насыщающихся трансформаторов с подмагничиванием и выявить их оптимальные параметры. Опытные кривые двойного намагничивания, построенные при постоянной индукции, позволяют рассчитать трансформаторы и одновременно являются в некотором масштабе характеристиками защиты. Следует рекомендовать, как наиболее простое и надежное, подмагничивание переменным током. Подмагничивание выпрямленным током может применяться в особых случаях. Трансформаторы с подмагничиванием могут с успехом применяться в дифференциальных, балансных и других защитах.

#### Литература

1. Л. А. Бессонов. Электрические цепи со сталью Госэнергоиздат, 1948.
2. Ю. Г. Толстов. Измерительные трансформаторы постоянного тока. Госэнергоиздат, 1951.
3. А. М. Федосеев. Релейная защита электрических систем. Госэнергоиздат, 1952.
4. Г. И. Атабеков. Релейная защита высоковольтных сетей. Госэнергоиздат, 1949.

[28. 9. 1953]



# Самораскачивание ионного преобразователя частоты при нагрузке на асинхронные двигатели

Кандидат техн. наук В. А. ЛАБУНЦОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

Для регулирования скорости вращения асинхронных двигателей возможно применить ионные преобразователи частоты [Л. 1, 2], имеющие перед электромашинными преобразователями ряд существенных преимуществ: полное отсутствие вращающихся частей и подвижных контактов; сравнительно высокий к. п. д. (90...95%); меньший вес, габариты и стоимость; возможность установки на более легких фундаментах; независимость (в большинстве конструкций) входной и выходной частот.

Однако ионные преобразователи до сих пор еще не нашли применения в промышленности в силу малой изученности их режимов работы и отсутствия до последнего времени достаточно совершенных вентиляй.

Автором разработана схема преобразователя для питания быстроходных асинхронных двигателей, применяемых в промышленности искусственного волокна (скорость вращения 4 000 ... 10 000 об/мин), кратко описанная в [Л. 4]. При разработке автор столкнулся с интересным явлением самораскачивания двигателей, сильно осложняющим работу преобразователя и приводящим в большинстве случаев к ее срыву. В настоящей статье описывается это явле-

ние самораскачивания и на основании анализа устанавливаются методы борьбы с ним.

До рассмотрения явления самораскачивания необходимо дать краткое

описание выходного звена преобразователя — многофазного автономного инвертора (иначе — инвертора с конденсаторной коммутацией), питаемого постоянным током от выпрямителя. На рис. 1 приведена упрощенная схема трехфазного<sup>1</sup> автономного инвертора с присоединенными к шинам переменного тока асинхронными двигателями АД. Нормальное чередование вентиляй 1, 2, 3 (коммутация тока) обеспечивается коммутирующими конденсаторами  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,ключенными на первичной стороне инверторного трансформатора ИТ. Конденсаторы являются также источниками реактивной энергии на стороне переменного тока инвертора и исправляют форму кривой выходного напряжения. Частота напряжения на выходе инвертора определяется частотой положительных импульсов, подаваемых на сетки вентиляй. При проводившихся исследованиях выходная частота инвертора лежала обычно в пределах 70...167 Гц и была рассчитана на получение скорости вращения двигателей (синхронной) 4 200...10 000 об/мин.

**Явление самораскачивания.** Экспериментально было обнаружено, что когда автономный инвертор нагружен на асинхронные двигатели, при определенных условиях в схеме возникают низкочастотные качания, проявляющиеся в виде одновременных колебаний амплитуд переменных токов и напряжений и в виде периодических изменений постоянного тока, потребляемого инвертором от выпрямителя. Колебания нарастают обычно очень бурно и почти всегда приводят к срыву работы инвертора. Опыт показывает, что, как правило, это явление возникает в стадии разгона двигателей.

На рис. 2 приведены осцилограммы, иллюстрирующие возникновение и развитие самораскачивания в схеме рис. 1 или в аналогичных схемах. Важно отметить, что появление качаний связано только с разгоном двигателей, так как

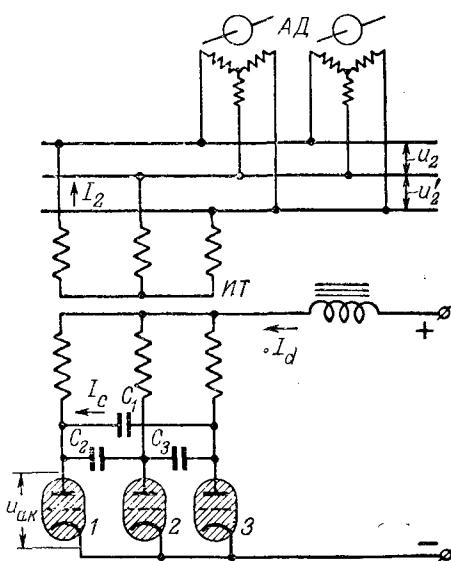
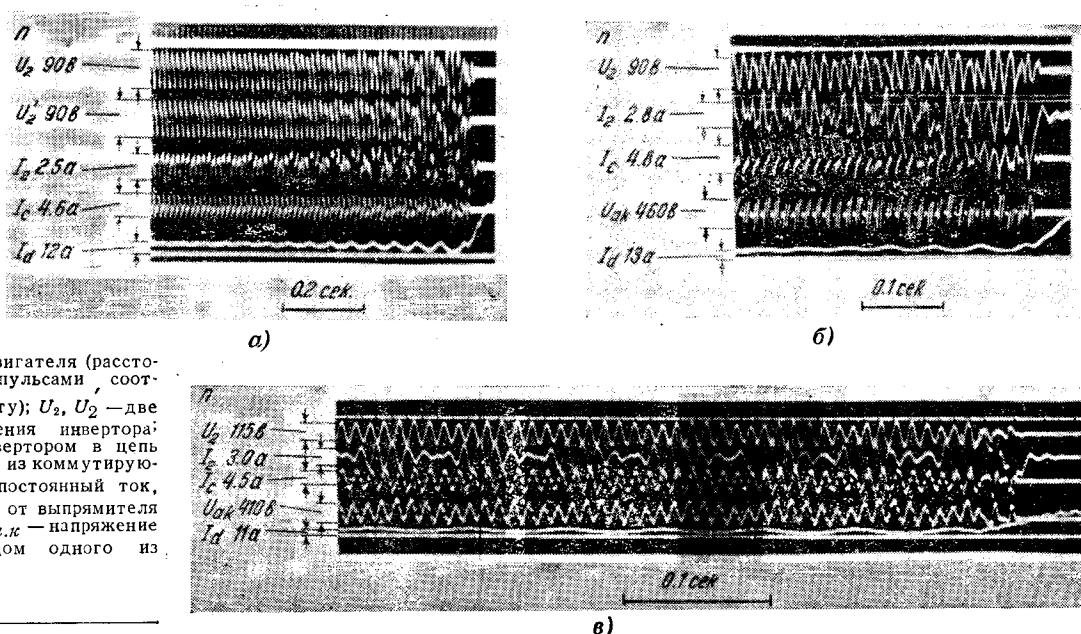


Рис. 1. Выходное звено ионного преобразователя частоты — трехфазный автономный инвертор, нагруженный на асинхронные двигатели АД.

<sup>1</sup> Применявшиеся на практике схемы шестифазного инвертирования могут быть для основной гармоники сведены к трехфазной.

Рис. 2.  
Осциллографы, иллюстрирующие возникновение и развитие самораскачивания в схеме рис. 1.

$n$  — скорость вращения двигателя (расстояние между двумя импульсами, соответствует одному обороту);  $U_2, U_2$  — две фазы выходного напряжения инвертора;  $I_2$  — ток, отдаваемый инвертором в цепь нагрузки;  $I_c$  — ток одного из коммутирующих конденсаторов;  $I_d$  — постоянный ток, потребляемый инвертором от выпрямителя (с нулевой линией);  $U_{ak}$  — напряжение между анодом и катодом одного из вентиляй.



никаких переключений или других изменений в схеме в процессе осциллографирования не происходило. Из рис. 2, а и 2, в видно, что изменение скорости вращения, происходящее при развитии качаний с момента их возникновения до срыва инвертора, весьма незначительно.

Необходимо отметить, что самораскачивание наблюдалось не только при питании быстроходных двигателей, но и при опытах с обычными асинхронными двигателями, работающими при частоте 45..60 гц.

Рядом опытов было установлено, что:

1) при любой интенсивности качаний, даже перед самым срывом инвертора, когда качания наиболее сильны, огибающая всех токов и напряжений в схеме близка к синусоиде и ни в одном из опытов не было отмечено релаксационного характера качаний;

2) предположения о феррорезонансном характере качаний не подтвердились, так как качания возникали даже в режимах, исключающих заметное насыщение инверторного трансформатора и двигателей;

3) качания можно было предотвратить, а в отдельных случаях ликвидировать после возникновения приключением к инвертору параллельно двигателям статической нагрузки с достаточным по величине активным или активно-индуктивным током;

4) при увеличении емкости коммутирующих конденсаторов инвертора качания возникали при меньшей скорости вращения двигателей и большей добавочной нагрузке;

5) качания, как правило, возникали при сравнительно высоких рабочих частотах инвертора — больше 70..80 гц.

Многочисленные опыты показали, что качания являются серьезным препятствием для питания быстроходных асинхронных двигателей. Необходимая дополнительная стабилизирующая нагрузка весьма велика и не может быть включена

постоянно, так как к. п. д. всего преобразователя падает при этом до 40..60%.

Д. А. Завалишин [Л. 1] указывает, что (срыв работы инвертора) при попытках повышения рабочей частоты преобразователя выше 60 гц проходило «нарушение течения коммутационного процесса». Эти нарушения были обусловлены, как было затем подтверждено Д. А. Завалишиным, возникающими в преобразователе низкочастотными колебаниями.

Изучение литературы и многочисленные эксперименты дали возможность установить, что описываемое явление полностью аналогично самораскачиванию асинхронных двигателей при питании их от обычной сети через последовательные конденсаторы (в частности при питании через линию электропередачи с продольной емкостной компенсацией) [Л. 4, 5] и в основе его лежит хорошо известное явление самовозбуждения асинхронной машины с помощью конденсаторов.

В литературе (например, [Л. 6, 7]) подробно рассмотрены режимы работы асинхронного генератора: асинхронной машины АМ (рис. 3), вращаемой посторонним двигателем  $D$  и питающей нагрузку  $R$  или  $R, L$ . Самовозбуждение обеспечи-

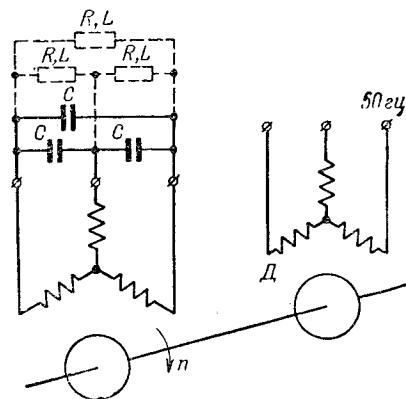


Рис. 3. Схема асинхронного генератора, вращаемого отдельным двигателем.

вается включенными в цепь статора или ротора конденсаторами  $C$ , являющимися источниками реактивного тока. Самовозбуждение может быть сорвано включением слишком большой нагрузки. В приложении приведены основные закономерности работы асинхронного генератора, необходимые для правильного понимания описываемого явления самораскачивания.

Из рис. 1 видно, что коммутирующие конденсаторы  $C_1, C_2, C_3$  инвертора, включенные на первичной стороне инверторного трансформатора  $IT$ , присоединены, как и конденсаторы  $C$  на рис. 3, параллельно обмотке статора асинхронных двигателей  $AD$  и, следовательно, могут явиться причиной их самовозбуждения. Важно отметить, что в схеме рис. 1 асинхронные машины  $AD$  получают энергию для вращения от инвертора и самовозбуждение их возможно без дополнительного вращающего двигателя (как на рис. 3). Вместе с тем к зажимам статоров не приключено никакой дополнительной нагрузки, которая могла бы сорвать их самовозбуждение.

Таким образом, в схеме рис. 1 возникнет самовозбуждение асинхронных машин  $AD$ , когда их скорость вращения, определяемая рабочей частотой инвертора, превысит нижнее критическое значение скорости, полученное (с некоторыми допущениями) из формулы (1, 1) (см. приложение). При этом машины будут одновременно работать в двух режимах: двигательном, поскольку они получают питание от инвертора, и генераторном, поскольку в схеме соблюдены условия самовозбуждения. Другими словами, двигатели, потребляя энергию при частоте питания, часть ее отдают при частоте самовозбуждения. Благодаря наличию в схеме активных сопротивлений скольжение машин, как генераторов, отлично от нуля и отрицательно, и частота самовозбуждения несколько меньше частоты питания. Наложение этих двух близких частот и дает наблюдаемую картину качаний, являющихся, таким образом, обычными биениями. Ряд специально поставленных экспериментов полностью подтвердил такое объяснение явления самораскачивания в системе автономный инвертор — двигатели.

Естественно, что при таком наложении колебаний двух частот на стороне переменного тока инвертора нарушается обычный вид кривой напряжения между анодом и катодом вентиляй  $U_{e,k}$  (см. осциллограммы рис. 2, б и в), в результате чего время, предоставляемое вентилям для восстановления управляющих свойств сетки, при определенной интенсивности качаний в некоторые моменты меньше допустимого. Это приводит к срыву работы инвертора. Этим же наложением колебаний двух частот объясняется появление низкочастотных пульсаций в кривой постоянного тока, потребляемого инвертором от выпрямителя.

Качания возникают обычно при рабочих частотах инвертора больше 70...80 гц, что обусловлено параметрами двигателей и значениями  $C$ , обычно имеющими место на практике; это подтверждает расчет. При значительном увеличении емкости коммутирующих конденсаторов было получено самораскачивание при частотах 40...50 гц. Ясно,

что для повышения нижней границы самовозбуждения с целью устранения самораскачивания необходимо уменьшать  $C$ , что, однако, ограничено условием обеспечения устойчивой работы инвертора. Для успешной борьбы с самовозбуждением двигателей необходим рациональный выбор дополнительной активно-индуктивной нагрузки (проводимости), включаемой к выходным шинам инвертора или преобразователя. Индуктивная составляющая проводимости позволяет уменьшить активную составляющую, но полностью исключить ее нельзя, так как одновременно с увеличением индуктивной нагрузки инвертора необходимо сильно повышать емкость конденсаторов для обеспечения условий нормальной коммутации.

**Определение границ самовозбуждения при наличии стабилизирующих проводимостей.** Определение границ самовозбуждения произведем для асинхронного генератора, вращаемого посторонним двигателем (схема рис. 3). Результаты анализа будут верны для схемы рис. 1, если предположить, что напряжение на шинах переменного тока инвертора не влияет на условия возникновения самовозбуждения двигателей и необходимо лишь для приведения двигателей во вращение. Другими словами, будем считать, что токи рабочей частоты инвертора и частоты самовозбуждения протекают в схемах рис. 1 независимо. Это предположение справедливо для линейной схемы, когда отсутствует насыщение двигателей и инверторного трансформатора. Не будем учитывать также активного сопротивления обмотки статора и потерь в стали. Неучет небольшого начального насыщения двигателей и инверторного трансформатора, обусловленного выходным напряжением инвертора, активного сопротивления цепи статора и потерь в стали сделает найденные границы самовозбуждения несколько шире действительных.

При сделанных допущениях схему замещения асинхронной машины с включенными в цепь статора конденсатором  $C$  и активной и индуктивной проводимостями  $G = \frac{1}{R}$  и  $\Gamma = \frac{1}{L}$  можно представить, как на рис. 4. Колебания в такой схеме (самовозбуждение) возникают в результате введения в нее энергии через отрицательное сопротивление  $\frac{r'_2}{s}$  (так, как  $s < 0$ ). Из соотношения

$$pC + \frac{\Gamma}{p} + G + \frac{1}{pL_x} + \frac{1}{pL_k + \frac{r'_2}{s}} = 0 \quad (1)$$

после элементарных преобразований получаем характеристическое уравнение для схемы рис. 4

$$\begin{aligned} p^3 CL^x L_k + p^2 L_x \left( C \frac{r'_2}{s} + GL_k \right) + \\ + p \left[ L_x \left( L_k \Gamma + G \frac{r'_2}{s} \right) + L_x + L_k \right] + \\ + \frac{r'_2}{s} (1 + L_x \Gamma) = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

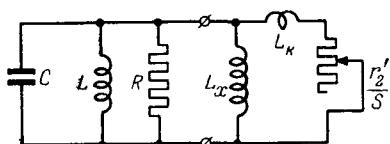


Рис. 4. Упрощенная схема замещения асинхронного двигателя с включенными в цепь статора конденсатором и активным и индуктивным сопротивлениями.

Определение условий самовозбуждения при переменной скорости вращения машины  $\Omega$  сделаем путем выделения областей устойчивости в плоскости комплексного переменного  $\sigma = \nu + j\Omega$ , где  $\nu$  — вспомогательный параметр, откладываемый по действительной оси ( $D$  — разбиение по одному параметру). Для этого в уравнение (2) подставим:

$$s = \frac{\omega - \Omega}{\omega} \text{ и } p = j\omega,$$

где  $\omega$  — генерируемая машиной частота. Тогда на основании уравнения (2) можно написать:

$$\begin{aligned} \sigma &= \nu + j\Omega = j\nu + \\ &+ \frac{r'_2}{L_x} \frac{\omega^2 CL_x - j\omega GL_x - L_x \Gamma - 1}{\omega^2 CL_k - j\omega GL_k - L_k \Gamma - 1 - \frac{L_k}{L_x}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Разделив действительную и мнимую части, получим выражение границы устойчивости в параметрической форме:

$$\nu = \frac{r'_2}{L_x} \cdot \frac{(\omega^2 CL_x - L_x \Gamma - 1)(\omega^2 CL_k - L_k \Gamma - 1 - \frac{L_k}{L_x}) + \omega^2 G^2 L_x L_k}{\left( \omega^2 CL_k - L_k \Gamma - 1 - \frac{L_k}{L_x} \right)^2 + \omega^2 G^2 L_k^2}, \quad (4)$$

$$\Omega = \omega \left[ 1 + \frac{r'_2 G}{L_k} \frac{L_k (\omega^2 CL_x - L_x \Gamma - 1) - L_x \left( \omega^2 CL_k - L_k \Gamma - 1 - \frac{L_k}{L_x} \right)}{\left( \omega^2 CL_k - L_k \Gamma - 1 - \frac{L_k}{L_x} \right)^2 + \omega^2 G^2 L_k^2} \right]. \quad (4a)$$

На рис. 5 построены границы  $D$  — разбиения<sup>2</sup> для случая разбега асинхронного двигателя с параметрами  $r'_2 = 2,4 \text{ ом}$ ,  $L_x = 0,175 \text{ гн}$  и  $L_k = 0,012 \text{ гн}$  при  $C = 1000 \text{ мкФ}$  (приведенное значение к фазе двигателя) и при определенных значениях  $G$  и  $\Gamma$ . Половина плоскости  $\sigma$ , соответствующая отрицательным значениям  $\Omega$ , на рис. 5 отброшена (кривая симметрична относительно оси  $\nu$ ). Так как при переходе с заштрихованной стороны границы устойчивости на нештрихованную действительная часть пары комплексно-сопряженных корней уравнения (2) становится положительной, зона самовозбуждения расположена между точками пересечения границы устойчивости с осью  $j\Omega$ . Эти точки опре-

деляют нижнюю и верхнюю критические скорости вращения  $\Omega_{kp.n}$  и  $\Omega_{kp.v}$  и соответственно крайние значения генерируемой машиной частоты  $\omega_{kp.n}$  и  $\omega_{kp.v}$ . Из рис. 5 видно, что по мере увеличения  $G$  и  $\Gamma$  границы зоны самовозбуждения сужаются и, в конце концов, эта зона вырождается (кривая 3). В последнем случае двигатель раскручивается до синхронной скорости  $\Omega_c$  без самовозбуждения.

Пары значений  $G$  и  $\Gamma$ , соответственно которым на рис. 5 построены кривые 1, 2 и 3, взяты для большей определенности для случая, когда вместо дополнительной статической активно-индуктивной проводимости, как предполагалось ранее, параллельно раскручивающемуся двигателю приключено соответственно 7, 9 и 16 таких же двигателей, но уже вращающихся при синхронной скорости<sup>3</sup>  $\Omega_c = 628 \text{ рад/сек.}$

Предполагается, что при разбеге предыдущих двигателей параллельно им была включена достаточно большая стабилизирующая проводимость, выключенная перед запуском 8, 10 или 17-го двигателя.

Экспериментальная проверка подтвердила расчеты. Колебания действительно возникали для указанных выше параметров при развороте первых 10...11 двигателей (кривая 2 рис. 5) и, как правило, не возникали при раскручивании 12-го двигателя. Однако, если выходное напряжение инвертора было меньше номинального на 10%,

самовозбуждение начиналось и при раскручивании 12 и 13-го двигателей. Повышение напряжения до 130...140% номинального вследствие насыщения стали приводит к уменьшению индуктивностей  $L_x$  и  $L$  и к увеличению вращающего момента двигателей и, следовательно, их ускорения при развороте. В этом случае удавалось без всяких стабилизирующих проводимостей получить нормальный разбег 9-го и даже 8-го

<sup>2</sup> Для построения проще использовать не выражение (4) и (4a), а выражение (3).

<sup>3</sup> Частота питания принята 100 Гц, номинальное скольжение ротора в двигательном режиме  $s_d = 0,032$ . Тогда значения  $G$  и  $\Gamma$ , соответствующие одному врачающемуся двигателю:  $G_1 \approx \frac{s_d}{r'_2} = \frac{0,032}{2,4} = 0,0133 \frac{1}{\text{ом}}$ ;  $\Gamma_1 \approx \frac{1}{L_x} = \frac{1}{0,175} = 5,7 \frac{1}{\text{гн}}$ .

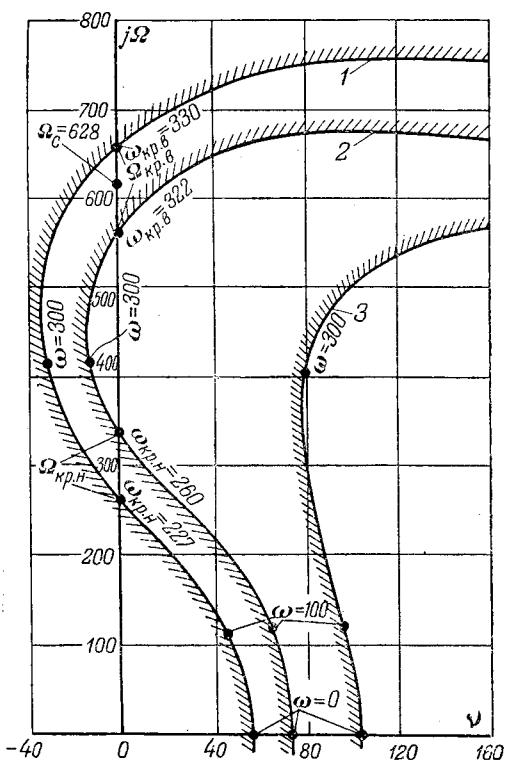


Рис. 5. Границы области устойчивости для различных значений  $G$  и  $\Gamma$ .  
 $1 - G=0,093 \text{ л/ом}; \Gamma=40,6 \text{ л/гн}$  (7 двигателей);  $2 - G=0,12 \text{ л/ом}; \Gamma=51,3 \text{ л/гн}$  (9 двигателей);  $3 - G=0,213 \text{ л/ом}; \Gamma=91 \text{ л/гн}$  (16 двигателей).

двигателя. В ряде случаев наблюдалось „благополучное“ прохождение двигателя через зону самовозбуждения, когда начавшиеся колебания затем пропадали (осциллограмма рис. 6).

Для суждения о вероятности возникновения самовозбуждения достаточно вместо построения всей границы области устойчивости найти лишь точки ее пересечения с осью  $j\Omega$ . Для этого, приравняв выражение (4) нулю, получим биквадратное уравнение относительно  $\omega$ , из которого, обозначив

$$\frac{1}{2C} \left( 2\Gamma + \frac{1}{L_k} + \frac{2}{L_x} \right) - \frac{G^2}{2C^2} = A, \quad (5)$$

$$\frac{(L_x\Gamma + 1) \left( L_k\Gamma + 1 + \frac{L_k}{L_x} \right)}{C^2 L_x L_k} = D, \quad (6)$$

получаем критические значения частоты  $\omega$ , определяющие нижнюю и верхнюю границы зоны самовозбуждения:

$$\omega_{kp,n} = \sqrt{A \pm \sqrt{A^2 - D}}. \quad (7)$$

Для отсутствия самовозбуждения необходимо, чтобы  $A^2 < D$ , откуда приходим к неравенству

$$\frac{1}{L_k^2} + \frac{G^4}{C^2} - 2 \frac{G^2}{C} \left( 2\Gamma + \frac{1}{L_k} + \frac{2}{L_x} \right) < 0, \quad (8)$$

из которого находятся значения  $G$  и  $\Gamma$ , необходимые для предотвращения самовозбуждения.

Из выражения (8) следует, что при  $G=0$  уничтожить совсем зону самовозбуждения путем увеличения  $\Gamma$  нельзя. Таким способом ее можно лишь отодвинуть в область частот, лежащих выше синхронной скорости вращения ( $\Omega_{kp,n} > \Omega_c$ ). Последнее, однако, исключено, если асинхронные двигатели питаются от автономного инвертора, так как при этом оказывается невозможной нормальная коммутация вентилем.

Для определения нижнего и верхнего критических значений скорости вращения  $\Omega$  необходимо  $\omega_{kp,n}$  и  $\omega_{kp,v}$ , полученные из (7), подставить в (4a).

Для удовлетворения неравенства (8) и обеспечения тем самым условия устойчивости, необходимо задаться рядом значений  $G$  и  $\Gamma$ , выбрав из них затем наиболее подходящие. Расчет можно сделать более наглядным, если построить границу  $D$  — разбиения в плоскости параметров  $G$  и  $\Gamma$ . Для этого в характеристическое уравнение (2) подставим  $p=j\omega$  и, разделив действительную и мнимую части, получим систему уравнений относительно  $G$  и  $\Gamma$ :

$$\begin{aligned} -\omega^2 L_k G + \frac{r'_2}{s} \Gamma + \frac{r'_2}{s} \frac{1}{L_x} (1 - \omega^2 C L_x) &= 0, \\ \frac{r'_2}{s} G + L_k \Gamma - \omega^2 C L_k + 1 + \frac{L_k}{L_x} &= 0, \end{aligned} \quad (9)$$

являющуюся параметрическим выражением искомой границы. Решив систему (9) и подставив в полученные уравнения  $s = \frac{\omega - \Omega}{\omega}$ , имеем:

$$= -\frac{r'_2 (\omega - \Omega)}{[(\omega - \Omega)^2 L_k^2 + r'^2_2] \omega}, \quad (10)$$

$$\Gamma = \omega^2 C -$$

$$-\frac{L_k (\omega - \Omega)^2 \left( 1 + \frac{L_k}{L_x} \right) + r'^2_2 \frac{1}{L_x}}{(\omega - \Omega)^2 L_k^2 + r'^2_2}. \quad (11)$$

На рис. 7 построены границы  $D$  — разбиения в плоскости  $G$ ;  $\Gamma$  — при прежних параметрах схемы. Скорость вращения  $\Omega$  при построении кривой 1 принята равной 628 рад/сек (синхронная скорость при частоте питания 100 гц), а для кривой 2 —  $\Omega=300$  рад/сек.

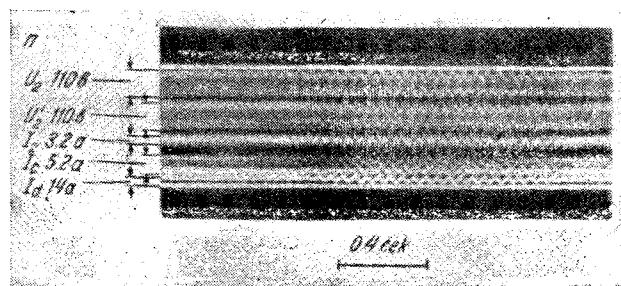


Рис. 6. Осциллограмма прохождения двигателя через зону самовозбуждения при разбеге (обозначения те же, что и на рис. 2).

Зона I в плоскости  $G, \Gamma$ , лежащая с заштрихованной стороны границы  $D$  — разбиения, является зоной устойчивости. В зоне II, напротив, лежат значения  $G$  и  $\Gamma$ , при которых в схеме рис. 4 существуют колебания.

Значения  $G$  и  $\Gamma$ , соответствующие различному числу развернувшихся до номинальной скорости двигателей, расположены на прямой (рис. 7) согласно уравнению:

$$\Gamma = \frac{r_2}{s_\theta L_x} G = \frac{2,4}{0,032 \cdot 0,175} G = 430G.$$

При изменении скорости вращения  $\Omega$  положение границы устойчивости на плоскости  $G, \Gamma$  меняется, так что выбранная заранее точка может попасть в зону самовозбуждения.

Из рис. 7 видно, что при  $G=0,12$  и  $\Gamma=51,3$  (9 развернувшихся двигателей) самовозбуждение возможно при значениях  $\Omega$ , близких к 300 рад/сек, а при достижении разгона щущимся двигателем номинальной скорости  $\Omega=628$  рад/сек он оказывается в устойчивой зоне II (ср. с кривой 2 рис. 5).

При разбеге 17-го двигателя граница области устойчивости на рис. 7 при всех значениях  $\Omega$  находится достаточно далеко от точки  $G=0,213$ ;  $\Gamma=91$  и самовозбуждение исключено (ср. с кривой 3 рис. 5).

**Методы борьбы с самораскачиванием.** Анализ и опыты показывают, что когда преобразователь предназначен для питания нескольких асинхронных двигателей (многодвигательный привод), запуск первых двигателей следует производить при включенном к выходным зажимам преобразователя стабилизирующей активно-индуктивной нагрузке. По мере разворота первых двигателей эта „пусковая“ нагрузка может быть снижена, а затем и вовсе отключена, когда число работающих двигателей будет достаточно для предотвращения самовозбуждения вновь включаемых, запуск которых при этом может произойти обычным путем. В случае, если часть двигателей при работе преобразователя отключается, необходимо следить, чтобы число оставшихся двигателей было не меньше минимально допустимого, определенного из условия  $\Omega_{k.p.v} < \Omega_c$ . В противном случае требуется включать дополнительную стабилизирующую нагрузку.

Условия отсутствия самовозбуждения для всех возможных режимов работы можно найти с помощью полученных формул.

Удобным способом введения или изменения индуктивной составляющей стабилизирующей проводимости является подмагничивание постоянным током инверторного трансформатора (или специального трехфазного реактора, включенного параллельно двигателям). Этот способ проверен экспериментально.

В случае, когда преобразователь питает один двигатель, также необходимо, чтобы верхняя критическая скорость вращения  $\Omega_{k.p.v}$  была за-

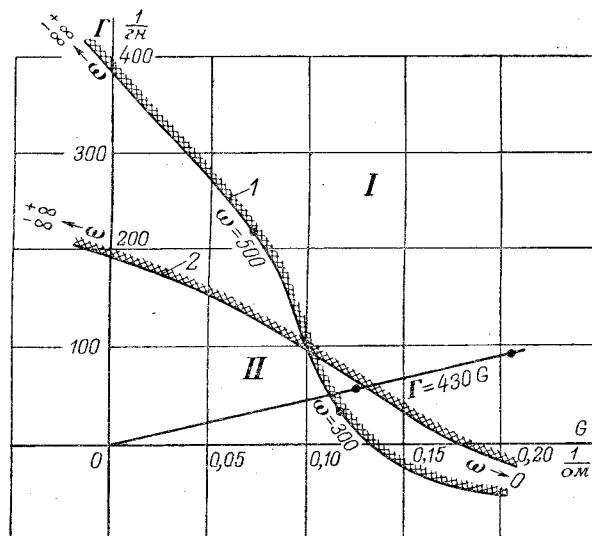


Рис. 7. Границы области устойчивости в плоскости параметров  $G$  и  $\Gamma$ .

1 —  $\omega=628$  рад/сек; 2 —  $\omega=300$  рад/сек.

метно меньше рабочей скорости  $\Omega_c$ . Лишь в этом случае можно отключить стабилизирующую нагрузку после разгона двигателя. Для уменьшения  $\Omega_{k.p.v}$  можно увеличить емкость коммутирующих конденсаторов, что одновременно приведет к увеличению нагрузочной способности инвертора.

Особое внимание во всех случаях следует обратить на неизменность выходного напряжения инвертора. Уменьшение этого напряжения при включении очередного двигателя приводит к увеличению скольжения у уже работающих двигателей, что вызывает еще большее снижение напряжения, дальнейшее падение скорости вращения и т. д. Кроме того, пониженное напряжение уменьшает степень насыщения  $L_x$  и  $L$ . Облегчение возникновения качаний при пониженном выходном напряжении инвертора неоднократно наблюдалось на практике. Необходимо поэтому в схеме предусмотреть достаточно быстродействующий регулятор выходного напряжения.

В отдельных случаях желательно поддерживать выходное напряжение повышенным, до 120...130% номинального. Кроме уменьшения скольжения и насыщения всех индуктивностей, это значительно ускорит также разбег включаемых двигателей, что особенно важно для многодвигательного привода, когда наличие нескольких одновременно разгоняющихся двигателей представляет известную опасность с точки зрения возникновения качаний.

Для облегчения борьбы с самовозбуждением желательна также возможно более близкая к синусоиде форма кривой выходного напряжения инвертора, увеличивающая вращающий момент двигателей и уменьшающая их скольжение. Кроме того, при несинусоидальном питающем напряжении увеличивается нагрев двигателей и оказывается практически невозможным отмеченное выше желательное повышение напряжения. По этой причине следует отдать предпочтение шестиступенчатому

фазным схемам инвертирования перед трехфазными.

Все сказанное выше относится как к схемам преобразователей с отдельными выпрямителем и инвертором, так и к схемам с совмещением функций выпрямителя и инвертирования [Л. 8].

Предлагаемые и испытанные меры не исключают полностью опасность самораскачивания. Учитывая актуальность вопроса, необходимо вести дальнейшие исследования для выяснения влияния режимов работы автономных инверторов на возникновение самораскачивания и для испытания новых методов коммутации тока с целью замены коммутирующих конденсаторов.

**Выводы.** 1. Описанное явление самораскачивания обусловлено самовозбуждением питаемых от автономного инвертора асинхронных двигателей.

2. С помощью приведенных формул, проверенных экспериментально, можно для любого практического случая определить границы самовозбуждения и найти параметры схемы и дополнительную стабилизирующую активно-индуктивную нагрузку, исключающую качания.

3. В случае многодвигательного привода двигатели, развернувшиеся до номинальной скорости, могут явиться стабилизирующим фактором при разбеге вновь включаемых двигателей.

4. С целью уменьшения вероятности возникновения качаний необходима разработка достаточно совершенных быстродействующих регуляторов выходного напряжения ионных преобразователей частоты.

Автор благодарит проф. И. Л. Каганова за ряд ценных советов и инж. И. В. Антика за участие в обсуждении результатов работы.

**Приложение.** Основные закономерности работы асинхронного генератора (рис. 3). Частота генерируемого напряжения определяется скоростью вращения ротора, индуктивностями холостого хода и короткого замыкания  $L_x$  и  $L_k$  машины, емкостью конденсаторов  $C$  и величиной и характером нагрузки. При холостом ходе генератора при повышении скорости вращения ротора  $n$  самовозбуждение возникает, когда круговая скорость вращения  $\Omega$  (в электрических рад/сек) становится равной нижней критической скорости

$$\Omega_{kp,n} = \frac{\pi p_1 n_{kp}}{30} \approx \frac{1}{V L_x C}, \quad (I,1)$$

где  $p_1$  — число пар полюсов. При этом генерируемая частота

$$\omega = \omega_{kp,n} = \frac{1}{V L_x C} \quad (I,2)$$

а скольжение ротора равно нулю (пренебрегая активным сопротивлением фазы статора  $r_1$ ). При увеличении скорости вращения частота и генерируемое напряжение растут; когда частота  $\omega$  принимает верхнее критическое значение:

$$\omega_{kp,v} = \frac{1}{V L_x C}, \quad (I,3)$$

самовозбуждение срывается. При этом скорость вращения

$$\Omega_{kp,v} = \frac{\pi p_1 n_{kp,v}}{30} \approx \left(1 + \frac{r'_2}{r_1}\right) \frac{1}{V L_x C}, \quad (I,4)$$

где  $r'_2$  — приведенное активное сопротивление фазы ротора, а скольжение ротора

$$s_{kp,v} = \frac{\omega_{kp,v} - \Omega_{kp,v}}{\omega_{kp,v}} = -\frac{r'_2}{r_1}. \quad (I,5)$$

При нагрузке асинхронного генератора, как известно, генерируемое напряжение и частота уменьшаются, скольжение увеличивается и границы самовозбуждения сближаются.

### Литература

- Д. А. Завалишин. Ионный преобразователь частоты для регулирования скорости асинхронного двигателя. Электричество, № 4, 1939.
- Г. И. Шевченко. Режимы работы ионного преобразователя частоты. Труды МЭИ им. Молотова. Вып. XIII, 1953.
- И. Л. Каганов. Применение электроники в промышленности. Электричество, № 7, 1953.
- С. Е. Вагнер. Самовозбуждение асинхронных двигателей с серийными конденсаторами. Trans. AIEE, т. 60, стр. 1241, 1941.
- Butler, C. Concordia. Исследование проблемы применения серийных конденсаторов. Trans. AIEE, т. 56, стр. 975, 1937.
- Ю. Д. Зубков. Асинхронные генераторы с конденсаторным возбуждением. Изд. АН Казахской ССР, Алма-Ата, 1949.
- А. А. Иванов. Асинхронные генераторы для гидроэлектрических станций небольшой мощности. Госэнергоиздат, 1948.
- Г. И. Шевченко. Стабилизация выходного напряжения ионного преобразователя частоты. Электричество, № 5, 1953.

[15. 3. 1954]



# Светильники с решетчатыми затенителями для люминесцентных ламп

Кандидат техн. наук Г. М. КНОРРИНГ

Ленинградское отделение Тяжпромэлектропроекта

Решетчатым затенителем называют систему планок, расчленяющих выходное отверстие светильника на отдельные части в целях получения определенного защитного угла.

Автор излагает здесь некоторые вопросы теории и практики применения светильников с решетками.

Как правило, для люминесцентных ламп применяются многоламповые светильники: на две лампы для местного освещения и на 2..4 (редко до шести ламп) для общего освещения. Большее число ламп встречается в люстрах и плафонах непроизводственных помещений. Для общего освещения почти исключительно применяются лампы мощностью 30 и 40 вт; в местном освещении используются лампы и меньшей мощности.

Большое влияние на к. п. д. светильника оказывает расстояние между лампами: чем оно меньше, тем большая доля светового потока ламп и в особенности потока отражателя поглощается поверхностями самих ламп. Расчеты и исследования МЭИ, ВЭИ и Ивановского института охраны труда, а также данные автора приводят к тому заключению, что расстояние между осями параллельных ламп в светильнике должно быть не менее трех диаметров лампы, а в светильниках с отражателями — около четырех диаметров лампы. Как исключение, можно допустить меньшие расстояния при жестко ограниченных размерах светильников. Исследования автора и Ю. Б. Оболенцева позволяют считать, что рекомендуемые расстояния обеспечивают такой тепловой режим светильника, при котором исключается заметное снижение светоотдачи ламп по причине высокой температуры окружающего воздуха.

Форма диффузного отражателя в светильниках лишь незначительно влияет на характер светораспределения, но существенно оказывается на к. п. д. светильника. Для получения наибольшего к. п. д. следует при данных размерах выходного отверстия стремиться к уменьшению площади отражателя, т. е. выполнять его возможно более мелким. Вместе с тем применение отражателей без торцевых стенок не может быть рекомендовано.

Решающее значение имеет качество окраски диффузных отражателей. При невозможности осуществить горячее эмалирование рекомендуется применение мочевинно-формальдегидной эмали марки У-311 по грунту У-223 (сушка 30—60 мин

В светильниках для люминесцентных ламп широкое применение получили решетчатые затенители. Рассматриваются элементы теории решеток и освещается опыт построения и применения светильников с решетками.

при температуре +110°), белой нитроэмали или белил на бесцветном разбавителе, но не на олифе.

Правила устройства люминесцентного освеще-

ния требуют, чтобы светильники, в которых лампы не закрыты светорассеивающей ободочкой, имели защитный угол не менее 15° в производственных помещениях и не менее 30° в административных, учебных, лечебных и тому подобных помещениях. Большие размеры ламп и сравнительно большое их число в одной арматуре затрудняют создание необходимого защитного угла краями отражателя, особенно в продольной плоскости. Возникает необходимость расчленить большое выходное отверстие светильника на отдельные ячейки, в пределах которых любой защитный угол может быть создан без увеличения размеров светильника. Для этого и служат решетчатые затенители. В общем случае они представляют конструкцию из точек планок, расположенных на ребро и пересекающихся под прямыми углами, образуя квадратные или прямоугольные ячейки (рис. 1). В этом случае создается защитный угол  $\gamma$ :

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{h}{a},$$

где  $h$  — высота планки,  $a$  — сторона ячейки. Значение  $h$  наиболее часто выбирается от 30 до 50 мм, что вместе с заданием  $\gamma$  определяет  $a$ . В художественных светильниках и плафонах иногда защитный угол увеличивают до 45°, принимая  $a = h$ .

Планки изготавливаются из стали или фанеры, окрашенных в белый цвет, или из рассеивающего, но желательно, не густого органического стекла.

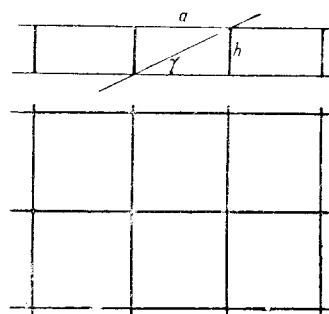


Рис. 1. Схема решетчатого затенителя

В общем случае решетка создает защитный угол как в поперечной, так и в продольной плоскости, но если оси зрения рабочих преимущественно направлены перпендикулярно осям ламп (местное освещение), достаточно иметь защитный угол только в поперечной плоскости, при направлении же осей зрения вдоль ламп — только в продольной плоскости.

Решетки дают исключительный эффект как способ ограничения слепящего действия ламп. Везде, где первоначально установленные светильники без защитного угла были в дальнейшем снабжены решетками, отмечалось улучшение условий освещения, несмотря на то, что освещенность рабочих мест снижалась примерно на 15%.

Решетки играют большую роль и как элемент архитектурного оформления светильника, и обычно их применение встречает полную поддержку художников. Принцип решетки использован уже во многих люстрах и плафонах, в частности в высотном здании МГУ. Из решеток можно создавать целые световые потолки, освещаемые расположенным над ними светильниками прямого света. Витрины многих магазинов освещаются через решетки на потолках.

Архитектурные формы решеток и рисунок их ячеек весьма разнообразны. Особенно подкупает возможность изготовления решеток местными средствами, как строительно-конструктивного элемента.

Недостатком решеток является их подверженность запылению и сравнительная трудность очистки, что заставляет воздерживаться от применения решеток в очень пыльных помещениях.

Для приближенной оценки влияния решеток на к. п. д. светильника будем условно их рассматривать как сплошные поверхности, световые свойства которых определяются, как обычно, коэффициентами отражения, пропускания и поглощения ( $\rho_p$ ,  $\tau_p$ ,  $\alpha_p$ ). Лампы и отражатель, находящиеся над решеткой, заменим условной поверхностью с равномерной яркостью. Отдельную ячейку решетки будем рассматривать как помещение без пола и потолка, форма которого характеризуется обычным индексом  $i$ , равным для

квадратной ячейки  $i = \frac{a}{2h} = \frac{1}{2 \operatorname{tg} \gamma}$ .

В общем случае свойства материала планок решетки определяются коэффициентами  $\rho$ ,  $\tau$  и  $\alpha$ . Планки предлагаются диффузно-рассеивающими.

Считая отдельные ячейки идентичными по распределению световых потоков, следует при-

знать, что на каждую стенку ячейки с обеих сторон падает одинаковый поток  $\varphi$ , поток же, излучаемый этой стенкой в любую из двух смежных ячеек, будет  $\varphi(\rho + \tau)$ . Это показывает, что при данном коэффициенте поглощения  $\alpha$  соотношение отражающей и пропускной способности планок решетки безразлично.

Суммируя потоки, падающие на стенки ячейки как непосредственно, так и в ходе многочленных отражений и определяя потоки, выходящие через нижнее и верхнее отверстия ячейки, можно получить следующие выражения для коэффициентов отражения и пропускания решетки в целом:

$$\rho_p = \frac{i}{2} (\rho + \tau) \frac{(1 - \eta)^2}{1 - (\rho + \tau)[1 - i(1 - \eta)]},$$

$$\tau_p = \eta + \rho_p.$$

Здесь  $i$  — индекс „помещения“, образованного стенками ячейки;  $\eta$  — коэффициент первичного использования потока диффузного потолка относительно пола (значения этого коэффициента вычислены несколькими авторами).

Подставляя в формулы значения  $\eta$  для различных защитных углов  $\gamma$ , получаем приводимую таблицу для  $\rho_p$  и  $\tau_p$ .

Сопоставляя эти значения с характеристиками рассеивающих стекол, можно убедиться, что при достаточно хороших свойствах материала планок решетка с защитным углом  $15^\circ$  по своему влиянию на к. п. д. светильника близка к матовому стеклу, решетка  $30^\circ$  — к опаловому и решетка  $45^\circ$  — к густому молочному стеклу.

Интересно сопоставить наши выводы с результатами опытов автора и Ю. Б. Оболенцева.

Исследовался светильник в виде деревянной рамы, в которой было установлено шесть ламп по  $30 \text{ вт}$  с расстоянием между осями  $80 \text{ мм}$ . Снизу рама могла закрываться различными решетками, сверху она оставалась открытой или же закрывалась диффузным отражателем. Коэффициент полезного действия светильника, открытого сверху, оказался 0,78 при решетке  $15^\circ$  и 0,74 при решетке  $30^\circ$ . В первом случае в верхнюю полусферу излучалось 58% всего потока светильника, во втором — 67%. Приведенные значения к. п. д. следует считать близкими к предельно возможным для светильников, построенных по указанной схеме.

$\gamma$	$\rho + \tau = 0,6$			$\rho + \tau = 0,7$			$\rho + \tau = 0,8$		
	$\rho_p$	$\tau_p$	$\alpha_p$	$\rho_p$	$\tau_p$	$\alpha_p$	$\rho_p$	$\tau_p$	$\alpha_p$
$15^\circ$	0,09	0,73	0,18	0,11	0,75	0,14	0,13	0,77	0,10
$30^\circ$	0,12	0,55	0,33	0,15	0,58	0,27	0,19	0,62	0,19
$45^\circ$	0,14	0,38	0,48	0,18	0,42	0,40	0,23	0,47	0,30

Расчет по приведенным формулам дает почти те же значения к. п. д.

Коэффициент полезного действия светильников с решетками, особенно 30°-градусными, уменьшается при снабжении их отражателями. Так, для опытной рамы с решеткой 15° к. п. д. уменьшился с 0,78 до 0,49, а с решеткой 30° с 0,74 до 0,36. Помимо обычных потерь в отражателе, это связано с поглощением потока отражателя блоком ламп и решеткой. По этой причине при светлых потолках помещения светильники преимущественно отраженного света могут оказаться экономичнее, чем светильники прямого света. Что касается светильников производственного типа с отражателями корытообразной формы, то по данным измерений снабжение их решеткой 20° понижает к. п. д. на 22% (относительных).

Тем не менее при правильно выбранных размерах и форме светильника и хороших свойствах материала к. п. д. светильников с решетками может быть достаточно высоким, если же учесть, что та или иная мера для ограничения ослепленности является обязательной и сопоставить решетки со стеклянными затенителями, то, как правило, преимущество окажется на стороне решеток.

Решетчатые затенители влияют также и на светораспределение светильников. Светильники прямого света с диффузным отражателем и без решетки имеют в продольной плоскости косинусное светораспределение, а в поперечной плоскости — промежуточное между косинусным и равномерным. Решетчатый затенитель, экранирующий лампы тем больше, чем больше угол  $\alpha$  между рассматриваемым направлением и вертикалью, должен в принципе делать светораспределение более глубоким.

Обработка данных большого числа измерений позволяет предложить для силы света светильников с решетками следующие эмпирические формулы:

$$\text{решетка } 15^\circ : I_\alpha = I_o \cos^{1.4} \alpha,$$

$$\text{решетка } 30^\circ : I_\alpha = I_o \cos^{1.8} \alpha,$$

где  $I_o$  — осевая сила света и  $I_\alpha$  — сила света в направлении угла  $\alpha$  с вертикалью.

Для случая, когда сила света изменяется пропорционально  $\cos^m \alpha$ , автор ранее получил выражение, определяющее условия светотехнически наивыгоднейшего (при данной минимальной освещенности требующего наименьшего потока ламп) расположения светильников общего освещения, а именно:

$$\lambda = \frac{2}{V_{m+1}},$$

где  $\lambda$  — отношение расстояния между светильниками к высоте подвеса над рабочей поверхностью. Можно показать, что при расположении светильников рядами тем же значением  $\lambda$  определяется наивыгоднейшее отношение расстояния между соседними рядами к высоте.

Подставляя в приведенную формулу значения  $m$  соответственно 1,4 и 1,8, получаем для

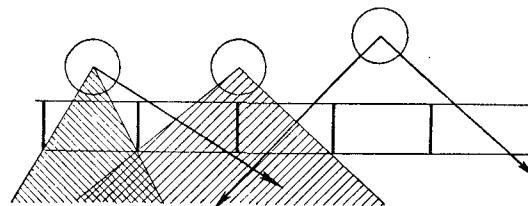


Рис. 2. Углы свободного выхода потока и образование вторичных максимумов при различных положениях ламп.

светильников с решеткой 15°  $\lambda = 1,3$  и с решеткой 30°  $\lambda = 1,2$ . Эти значения  $\lambda$  рекомендуются к руководству, хотя в известных пределах допустимы отклонения от них.

Решетки с квадратными ячейками несколько сглаживают разницу между кривыми силы света в продольной и поперечной плоскостях, и в первом приближении светораспределение светильников с решетками можно считать симметричным.

Решетки позволяют, однако, в известных пределах получать и резко отличное от симметричного светораспределение. Мы имеем в виду решетки с неквадратными ячейками, решетки с наклонными планками, иногда применяемые для направленного освещения вертикальных поверхностей, и некоторые другие случаи.

До сих пор мы исходили из возможности замены блока ламп и отражателя равнояркой поверхности. В действительности яркость поверхности, находящихся над решеткой, не равномерна, благодаря чему как на к. п. д. светильника, так и на форму кривой силы света влияет также положение ламп относительно решетки.

По условию наибольшего к. п. д. расстояние от ламп до верхней стороны решетки следует принимать минимально возможным при съемных решетках — около 10...15 мм в свету, с тем, чтобы уменьшить высоту светильника и сократить потери света на его стенах.

Лампы могут располагаться как над центрами ячеек, так и над планками. Из рис. 2 видно, что во втором случае большая доля потока свободно проходит сквозь решетку. По данным предварительных измерений, к. п. д. в этом случае повышается на 5...8% относительных. Кроме того, если лампы размещаются над планками, то кривая силы света в поперечной плоскости оказывается более широкой, что во многих случаях желательно и позволяет несколько увеличить рекомендованные выше значения  $\lambda$ . Из рис. 2 видно также, что при размещении лампы между планками и далеко от решетки ее поток выходит частично через соседние ячейки. При этом на кривой силы света создаются нежелательные вторичные максимумы в наклонных направлениях, вызывающие «полосатость» освещения. Вторичные максимумы смягчаются, если расстояние между лампами выбирается некратным стороне ячейки; еще лучшие результаты дает приближение ламп к решетке, особенно если лампы располагаются над планками.

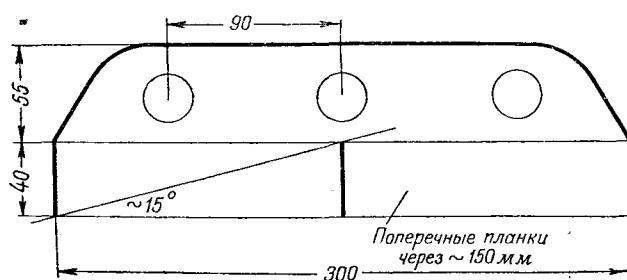


Рис. 3. Светотехническая схема трехлампового светильника.

При конструировании светильников необходимо обеспечить одинаковую яркость планок одного направления. Для этого отнюдь нет необходимости ставить лампы над каждой планкой или между каждыми двумя планками. Надо только обеспечить, чтобы каждая планка без затенений освещалась ближайшей к ней лампой, учитывая при этом, что лампы, стоящие над планкой, данную планку почти не освещают.

Испытание опытной рамы с ячейками  $80 \times 80 \text{ мм}$  при высоте планок  $45 \text{ мм}$  и расстоянии от осей ламп до решетки  $45 \text{ мм}$  показало, что яркость остается достаточно равномерной при расстоянии между лампами до  $160 \text{ мм}$  и любом положении ламп относительно планок. При большой площади поверхностей, перекрытых решетками, иногда оказывается, что расстояние между лампами значительно больше, чем ширина ячейки. В этом случае для получения равномерной яркости планок приходится удалять лампы от решетки.

Равномерность яркости планок легче обеспечить, если планки выполняются из просвечивающего рассеивающего материала (оргстекло). В этом случае улучшается также внешний вид решетки.

Приводим в заключение краткое описание некоторых характерных конструкций светильников с решетчатыми затенителями.

На рис. 3 представлена светотехническая схема основного, по нашему мнению, типа светильника для производственных помещений: прямого

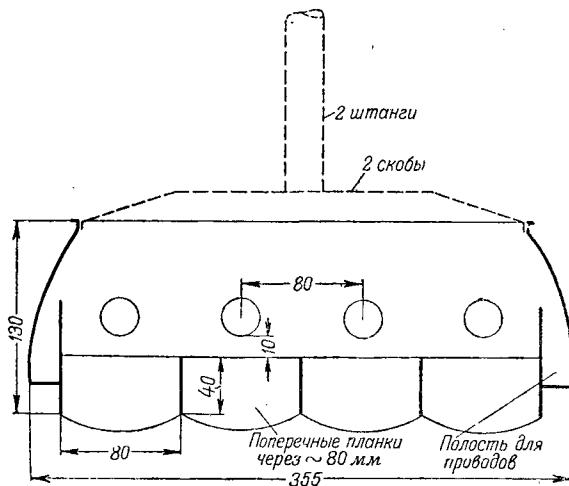


Рис. 4. Металлический светильник преимущественно отраженного света.

света, с диффузным отражателем, на три лампы. Решетчатый затенитель создает в обеих плоскостях защитный угол  $15^\circ$ . Дроссели и контактные части патронов располагаются над отражателем в полости, закрытой кожухом (на рисунке не показана).

На рис. 4 изображен металлический светильник преимущественно отраженного света, на четыре лампы. Сверху светильник открыт, снизу снабжен решеткой с защитным углом  $30^\circ$ . Небольшие фестоны на планках решетки значительно улучшают внешний вид светильника. Дроссели расположены на потолке, в розетке прямоугольной формы.

Коэффициент полезного действия  $0,62$ ;  $\sim 60\%$  потока светильника направляется в верхнюю полусферу. Подобные светильники с успехом применены в некоторых производственных помещениях.

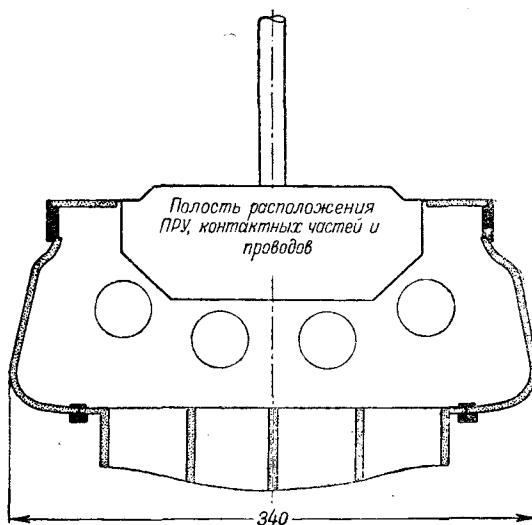


Рис. 5. Светильник Л-11 — Б-44 из серии светильников для высотных зданий.

ниях со светлыми потолками и в помещениях конторского типа. Известное применение нашли деревянные «люстры», изготовленные по той же принципиальной схеме, но с дросселями, расположенными в уширенных ободах.

Значительно совершеннее в конструктивном отношении светильник, изображенный в разрезе на рис. 5, разработанный конструкторским бюро под руководством инж. Кулакова для высотных зданий Москвы. Бока, верх и решетка этого светильника выполнены из молочного оргстекла с большим пропусканием, что обеспечивает высокий к. п. д. (около 0,65). Дроссели размещены во внутренней полости. Металлические части выполнены из анодированного алюминия. Светильник, конечно, может быть изготовлен только специализированным предприятием. Из светильников для высотных зданий следует также упомянуть плафоны на разное число ламп с художественной решеткой из оргстекла.

В последнее время автору пришлось столкнуться с задачей люминесцентного освещения рабочих мест, расположенных вдоль конвейерных лент. Предложенные для этой цели светильники

могут, как нам кажется, рассчитывать на довольно широкое применение.

Работы проводились на фабрике «Первомайская» в Ленинграде. Здесь в пошивочных цехах столики работниц расположены по обе стороны от ленты конвейера, оси зрения направлены вдоль ленты. Естественным решением было размещение светильников локализованного освещения в один ряд над осью конвейера, что обеспечивало целесообразное направление света, слева. В первом варианте были применены трехламповые светильники по схеме рис. 3, но только с поперечными планками, так как основное значение имел защитный угол в продольной плоскости. Высота подвеса над полом составляла 2 м. В светильниках, расположенных в виде почти непрерывного ряда, было установлено по три лампы БС-30. Освещенность рабочих мест составляла 400...450 лк, что обеспечило возможность работы без местного освещения.

В описанном варианте наибольшая освещенность создавалась не на рабочих местах, а на ленте конвейера. Для получения более рационального и экономичного распределения света был разработан и испытан новый тип светильника, который имеет отдельные для каждой из двух ламп зеркальные отражатели трапециoidalной формы, составленные из плоских стеклянных зеркал и рассчитанные так, чтобы получить наибольшую силу света в направлениях 20...40° с вертикалью. Как и в первом варианте, для ограничения слепящего действия были использованы поперечные планки решетчатого затенителя.

Схема светильника и результаты фотометрирования опытного образца даны на рис. 6. Кривая силы света в продольной плоскости близка к косинусной. Коэффициент усиления светильника в направлениях на рабочие места несколько больше трех, к. п. д. равен 0,76. По сравнению с диффузными светильниками зеркальный светильник оказался почти в 2 раза экономичнее и, в частности, при описанном выше расположении ряд двухламповых светильников создал на рабочих местах освещенность 500...550 лк. Стоимость двухлампового зеркального светильника не превышает стоимости трехлампового диффузного, включая и вспомогательную аппаратуру ламп<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Автор отмечает ценное и активное участие в работах, проведенных на фабрике «Первомайская», главного механика фабрики Е. М. Глауберзона.

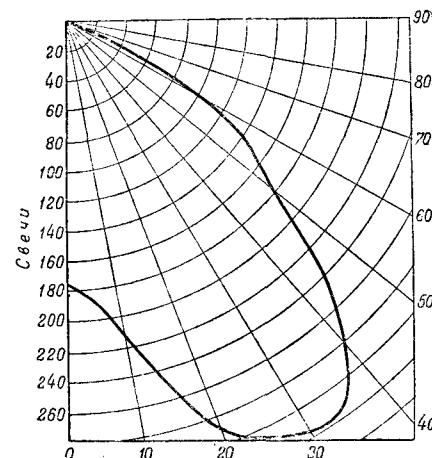
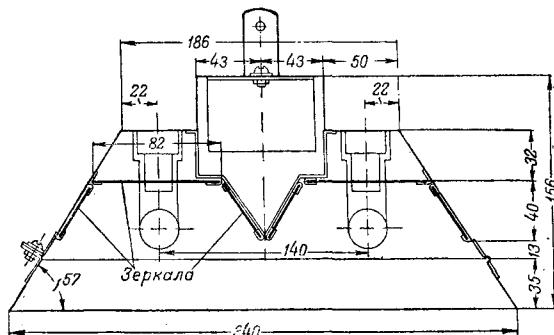


Рис. 6. Зеркальный двусторонний светильник и его кривая силы света в поперечной плоскости (при общем потоке ламп в светильнике 1 000 лм).

Как показывает расчет, для освещения двухленточных конвейеров, часто встречающихся в швейной промышленности, целесообразно применение трехламповых зеркальных светильников при высоте подвеса около 2,6 м.

Решетчатые затенители, конечно, не являются обязательной принадлежностью люминесцентных светильников. Наравне с ними широко применяются и светильники с рассеивающими стеклами. Однако они несколько сложнее в изготовлении и, судя по тем неполным данным, которыми мы пока располагаем, во всяком случае по светотехническим характеристикам, не лучше решетчатых.

[12. 2. 1954]



# Применение люминесцентных ламп для наружного освещения

**Кандидаты техн. наук Я. Б. ЗИЛЬБЕРБЛАТ, М. А. ОСТРОВСКИЙ, С. Н. ФЕДОТКИН**  
Академия коммунального хозяйства им. Памфилова

Высокая экономичность люминесцентных ламп, правильная цветопередача, а также малая яркость делают целесообразным их применение для целей наружного освещения, в первую очередь, для освещения улиц с зелеными насаждениями, бульваров, скверов и пр. Однако до настоящего времени люминесцентные лампы не могли быть использованы в этих условиях вследствие резкого уменьшения их излучения при понижении температуры окружающей среды (рис. 1).

Как показали исследования, можно обеспечить сохранение температуры стенок колбы лампы на наивыгоднейшем уровне, создав изоляционную воздушную прослойку между стенками лампы и стеклянной рубашкой (рис. 2).

Количество тепла, выделяемое лампой,

$$Q = -\frac{(t_a - t_b) \pi l}{\frac{1}{2(\lambda_k + \lambda_a)} \ln \frac{d_1}{d_a} + \frac{1}{(\sigma_k + \alpha_a) d_2}},$$

где  $t_b$  — температура наружного воздуха;  $t_a$  — температура стенок лампы;  $d_a$  — диаметр трубы лампы;  $d_1$  и  $d_2$  — внутренний и внешний диаметры рубашки;  $l$  — длина лампы;  $\lambda_k$  и  $\lambda_a$  — условные коэффициенты теплопроводности воз-

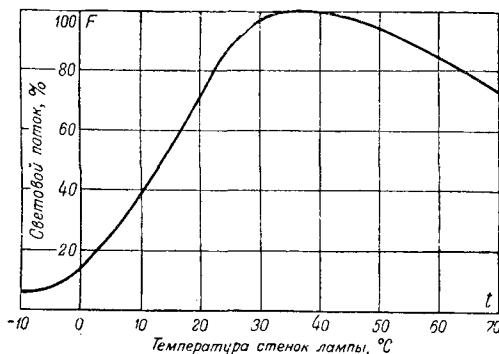


Рис. 1. Зависимость светового потока 30-ватт люминесцентных ламп от температуры стенок лампы.

Понижение температуры окружающей среды резко уменьшает световой поток, излучаемый люминесцентными лампами, что затрудняет их использование для целей наружного освещения. Повышение эффективности использования люминесцентных ламп в условиях наружного освещения может быть достигнуто применением теплоизоляционных рубашек. Для надежного автоматического включения люминесцентных ламп в условиях низких температур должны быть использованы специальные тепловые реле. Максимальная величина потери напряжения в сети наружного освещения в установках с люминесцентными лампами не должна превышать 8...10%. Опытная проверка полученных результатов подтвердила возможность использования люминесцентных ламп для целей наружного освещения.

дущной прослойки за счет теплопередачи конвекцией  $\lambda_k$  и излучением  $\lambda_a$ ;  $\sigma_k$  и  $\alpha_a$  — коэффициенты теплоотдачи стеклянной рубашки конвекцией и излучением.

В условиях наружного освещения температура воздуха  $t_b$  изменяется в пределах от -40 до +30°C. Для этих пределов изменения температуры  $\lambda_k = 0,00117 \cdot (\Delta t)^{0,3}$ , где  $\Delta t = t_a - t_b$ .

Условный коэффициент теплопроводности возрастает с толщиной прослойки  $\delta$  и при малых ее значениях  $\lambda_k = \lambda_a = 0,0210$ , и

$$\lambda_a = \frac{C_n d_a \left[ \left( \frac{T_a}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_b}{100} \right)^4 \right] \ln \frac{d_1}{d_a}}{2 \Delta t},$$

где  $C_n$  — приведенный коэффициент лучеиспускания, равный в среднем 4,4;  $T_a$ ,  $T$  — температуры стенок лампы и стенки рубашки в °K;

$$\sigma_k = 0,007 \frac{\Delta t^{1/4} \cdot d_2^{3/4}}{d_1},$$

где  $\Delta t = t_a - t_b$ ;

$$\alpha_a = \frac{C \left[ \left( \frac{T_a}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_b}{100} \right)^4 \right]}{t_a - t_b},$$

где  $C = 4,6$  — коэффициент лучеиспускания стекла.

Во избежание потерь светового потока толщина стекла рубашки должна быть минимальной, порядка 1,5...2 мм, поэтому мы пренебрели перепадом в стенке рубашки.

Среднее значение скорости ветра в городах составляет  $w \approx 1 \dots 4 \text{ м/сек}$ . Для этих пределов изменения скорости ветра коэффициент теплопередачи от стекла в воздух

$$\alpha_w = 55 \frac{w^{0,5}}{d_2^{0,4}}.$$

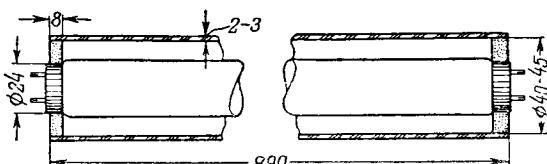


Рис. 2. Схема устройства теплоизоляционной рубашки для лампы мощностью 30 вт.

Полное количество тепла  $Q$  можно определить экспериментально по  $t_b$  и  $t_a$ . В частности, для ламп мощностью 30 вт  $Q = 19,0 \text{ ккал/час.}$

Разработанная методика теплового расчета люминесцентных ламп с тепловой изоляцией позволила определить температуру стенок лампы и излучаемый световой поток при различных значениях окружающей температуры  $t_b$  и скорости ветра  $w$ . По данным этого расчета для люминесцентной лампы 30 вт при оптимальном диаметре рубашки, скорости воздуха  $w = 0$  и  $t_b = -35^\circ\text{C}$  световой поток, излучаемый лампой, уменьшается на 35...40 %. При наличии ветра уменьшение светового потока еще значительнее. Однако необходимо учитывать, что при низких значениях температуры воздуха скорость ветра обычно мала. Поэтому при использовании теплоизоляционной рубашки максимально возможное уменьшение светового потока люминесцентных ламп в наружных условиях фактически не превышает 30...40 %.

Полученные результаты проверялись экспериментально на открытом воздухе зимой 1950—1951 гг. Испытания проводились для серии ламп мощностью 15 и 30 вт. На рис. 3 приведены полученные результаты для 30-ватт люминесцентных ламп с теплоизоляционной рубашкой. Из этого рисунка видно, что в зависимости от температуры окружающей среды изменяется и время установления стационарного режима работы ламп. Например, при температуре среды  $-35^\circ\text{C}$  стационарный режим лампы в теплоизоляционной рубашке устанавливается через 22 мин после начала разряда, а при  $+6^\circ\text{C}$  — через 8 мин. В среднем можно считать, что нормальный режим работы люминесцентных ламп с тепловой изоляцией в наружных условиях наступает через 10...15 мин с момента включения. Сравнение полученных данных с расчетными кривыми показало хорошее совпадение.

Практически, в наружных условиях имеет место непрерывное изменение скорости ветра и температуры воздуха. Эффективность работы ламп в таких условиях должна быть оценена по значению суммарного светового потока, излучаемого лампой в определенный промежуток времени. Суммарный поток можно определить на основании данных климатологических карт, дающих число дней со средней суточной температурой для данного пояса. Результаты этого расчета для широты Москвы представлены на рис. 4, на котором даны среднемесячные значения эффективности для открытой лампы и лампы в теплоизоляционной рубашке.

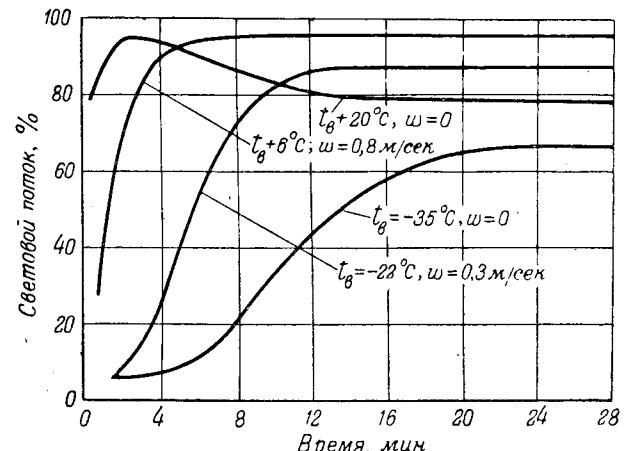


Рис. 3. Режим работы 30-ватт ламп в теплоизоляционной рубашке при различных температурах и скорости воздуха.

Анализ полученных результатов показывает, что, применяя теплоизоляционные рубашки, можно значительно повысить эффективность работы люминесцентных ламп. Эффективность работы открытых ламп в течение года колеблется от 23 % для зимних месяцев до 95 % — в летнее время. Соответственно для лампы в рубашке эти значения составляют: 89,5 и 86,5 %. Интересно отметить, что при использовании двойных теплоизоляционных рубашек средняя годовая эффективность получается на 10 % ниже, чем для лампы в одной рубашке, за счет резкого снижения их эффективности в летнее время.

Для получения среднегодовой эффективности работы ламп необходимо также учитывать число часов работы ламп. С учетом этого фактора коэффициент среднегодовой эффективности составит для открытой лампы 54,5 %, а для лампы в рубашке — 91,5 %.

Для люминесцентных ламп напряжение зажигания зависит также от температуры стенок трубки, определяющей плотность паров перед зажиганием.

В современных люминесцентных лампах в качестве газа наполнения используется аргон, облегчающий зажигание лампы и уменьшающий катодное падение. Нормально давление аргона составляет 3...4 мм. С уменьшением давления арго-

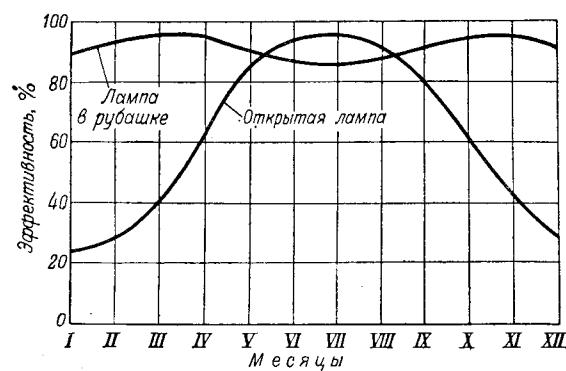


Рис. 4. Эффективность 30-ватт люминесцентных ламп для широты Москвы.

на, как известно, падает напряжение зажигания, но при этом сокращается срок службы ламп по причине увеличения катодного падения в лампе. Проведенные эксперименты показали, что получающееся в этом случае уменьшение потенциала зажигания лампы незначительно. В силу этого, а также учитывая сокращение срока службы ламп при уменьшении давления аргона, можно сделать вывод о нецелесообразности применения специальных люминесцентных ламп с пониженным давлением.

Можно облегчить зажигание люминесцентных ламп, повысив первичную ионизацию газа в разрядном промежутке. Для этой цели было применено специальное реле, которое увеличивает время прогрева электродов с понижением температуры воздуха (рис. 5). Основными элементами теплового реле являются размыкающие биметаллические контакты *а* и нагревательная спираль *б*, которая изготавливается из никрома. Размыкающие контакты и электроды нагревательной спирали монтируются на панели из изолирующего материала и помещаются в стеклянный баллончик. Расположение биметаллических контактов должно быть таково, чтобы их изгиб при нагревании происходил в одном направлении, в сторону спирали.

В момент включения электроды ламп, дроссель и нагревательная спираль включены последовательно, так как в нормальном положении размыкающие контакты спирали сближены. Ток, проходя через спираль, нагревает ее, в результате нагревается нижняя биметаллическая пластинка, которая отходит от верхней и разрывает контакт, зажигая разряд в лампе. Время, необходимое для нагрева нижней пластинки, будет возрастать с понижением температуры окружающего воздуха, увеличивая тем самым продолжительность накала электродов.

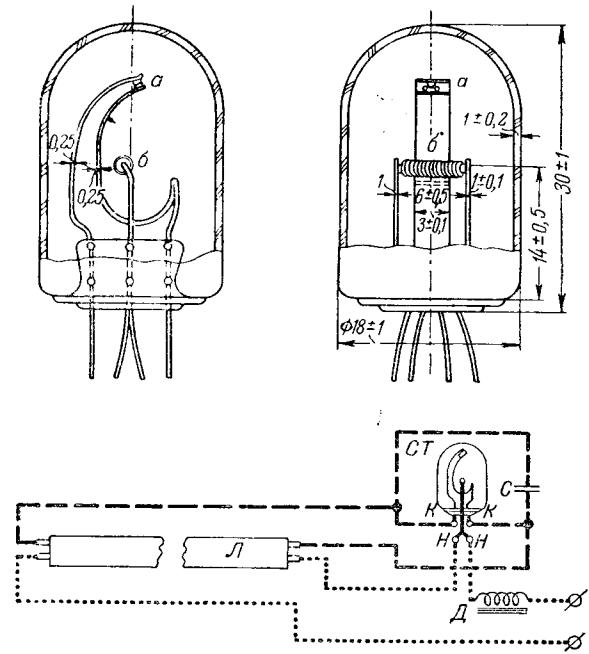


Рис. 5. Схема устройства и включения теплового реле. *а*—размыкающие биметаллические контакты; *б*—нагревательная спираль.

После возникновения разряда рабочий ток лампы, протекая через нагревательный элемент реле, обеспечивает достаточное количество тепла, чтобы контакты оставались разомкнутыми. Мощность реле для 15-ватт ламп не превышает 0,5 вт.

Для облегчения зажигания лампы параллельно размыкающим контактам следует включать конденсатор емкостью 0,01...0,02 мкФ, увеличивающий крутизну волн экстратока при размыкании. В зависимости от размеров конденсатор может быть вмонтирован внутри стеклянного баллончика или вне его.

Испытание опытной партии тепловых реле, разработанных и изготовленных академией, показало, что реле обеспечивают надежное включение люминесцентных ламп различной мощности в условиях низких температур и не вызывают сокращения срока службы.

При решении вопроса об использовании люминесцентных ламп в установках наружного освещения необходимо выявить характер изменения параметров ламп при изменении напряжения сети. В сетях уличного освещения вследствие их значительной протяженности напряжение на лампах, удаленных от источника питания, практически ниже номинального. Предельное значение потери напряжения в этих сетях при освещении лампами накаливания допускается по стандарту до 6%, в отдельных неблагоприятных случаях до 8%. Однако эти предельные допуски были установлены, исходя из характера изменения параметров ламп накаливания. Для люминесцентных ламп взаимная связь между световыми и электрическими характеристиками имеет совершенно иной характер, что обуславливает и другие требования к качеству подводимого напряжения.

Весьма важным является также вопрос о характере изменения теплового режима ламп при изменении напряжения сети. Приведенные выше данные о работе ламп при низких температурах относятся к нормальному режиму при номинальном напряжении сети. При снижении напряжения сети и уменьшении подводимой мощности изменяется общий тепловой баланс лампы, что естественно приводит к изменению температурного режима на колбе лампы и стенках теплоизоляционных рубашек. При уменьшении напряжения сети затрудняется также и зажигание лампы, в особенности при низких температурах окружающей среды.

В соответствии с этим были определены характеристики 30-ватт ламп при понижении напряжения сети. Исследованиям были подвергнуты 10 ламп типа БС-30. Для каждой лампы определялись: ток *i*, скомпенсированный ток *i'*, световой поток *F*, установившаяся температура на стенах колбы лампы *t<sub>1</sub>* и тепловой поток излучения *q<sub>λ</sub>* при различных напряжениях сети. На основании полученных экспериментальных данных были определены расчетным путем мощность *P*, световая отдача *η*, угол сдвига между вектором тока нагрузки и напряжением *φ*, коэффициент мощности *cos φ*, конвективный тепловой поток *q<sub>k</sub>* и общий тепловой поток

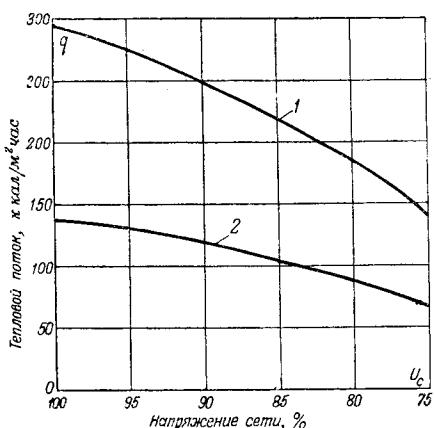


Рис. 6. Термический поток 30-ваттной лампы в зависимости от напряжения сети.

1 — общий тепловой поток; 2 — тепловой поток излучения.

лампы  $q$ . Напряжение сети изменялось от 100% номинального значения до 75. Результаты исследований показали, что перечисленные характеристики колеблются для отдельных ламп в довольно широких пределах.

Зависимость теплового потока излучения, а также общего теплового потока 30-ваттной лампы от напряжения сети представлена на рис. 6. Из рисунка видно, что тепловые потоки уменьшаются пропорционально снижению общей потребляемой мощности и, в соответствии с этим, при изменении напряжения сети изменяется установленная температура на стенке лампы.

Характер изменения световой отдачи ламп с уменьшением напряжения сети также зависит от температуры условий среды. При  $t_e = +20^\circ\text{C}$  и  $U_c = 0,8 \cdot U_{\text{ном}}$  световая отдача составляет 70% от номинальной, при  $t_e = -20^\circ\text{C}$  и том же напряжении сети световая отдача снижается до 50%, а при  $t_e = -40^\circ\text{C}$  до 12% от номинального. Это диктует необходимость установить предельно-допустимое значение падения напряжения в сетях с люминесцентными лампами.

Как указывалось выше, критерием для оценки работы ламп в наружных условиях служит их среднегодовая эффективность. Этот критерий был также принят для оценки влияния изменения напряжения сети на работу ламп в этих условиях. Результаты расчетов показали, что при изменении напряжения сети до  $U_c = 0,9 \cdot U_{\text{ном}}$  среднегодо-

вая эффективность ламп снижается незначительно. С дальнейшим понижением напряжения связана более значительные потери суммарного светового потока. Анализ потерь светового потока и расхода проводникового материала в сетях с люминесцентными лампами показывает, что с технико-экономической точки зрения в этих сетях может быть допущена потеря напряжения порядка 15...17%. Однако с понижением напряжения сети, как уже указывалось, затрудняется зажигание ламп. Кроме того, понижение напряжения сети может привести к сокращению срока службы ламп при изменении эмиссионного режима электродов. Поэтому предельно допустимое падение напряжения сети не должно превышать 8...10%.

Экономичность люминесцентных ламп в значительной степени зависит от срока их службы. При работе ламп с теплоизоляционными рубашками в наружных условиях возникает ряд физических причин, вызывающих более интенсивное распыление материала электродов. Этими причинами являются: перегрев электродов при положительной температуре среды, более длительное время предварительного накала электродов и повышенная плотность тока на электродах с момента возникновения разряда до установления стационарного режима.

Все эти факторы обусловливают ухудшение эмиссионных свойств электродов и связанное с этим повышение потенциала зажигания, что, в конечном итоге, должно привести к сокращению полного срока службы ламп. Изменение эмиссионных свойств электродов влияет также на полезный срок службы ламп, так как при этом уменьшается их излучательная способность. Указанные обстоятельства вызывают некоторые опасения о возможности резкого уменьшения срока службы люминесцентных ламп при работе их в установках наружного освещения.

В соответствии с этим было проведено исследование срока службы люминесцентных ламп при работе их на открытом воздухе. Предварительно определялись начальные световые и электрические характеристики испытуемых ламп при нормальном тепловом режиме после 100-часового обжига. В дальнейшем характеристики ламп определялись в тех же условиях через определенное число часов их работы. С целью сокращения длительности опытов был применен цикл включения ламп в 0,5 час. Нормальный срок службы ламп при таком цикле включений составляет по

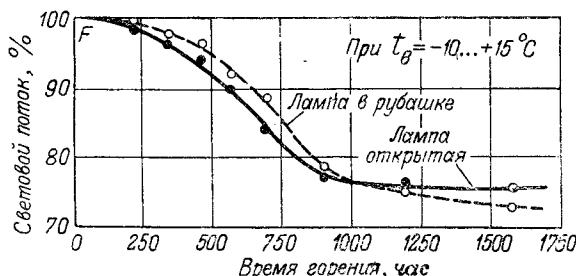


Рис. 7. Уменьшение светового потока 30-ваттной лампы в зависимости от времени горения.

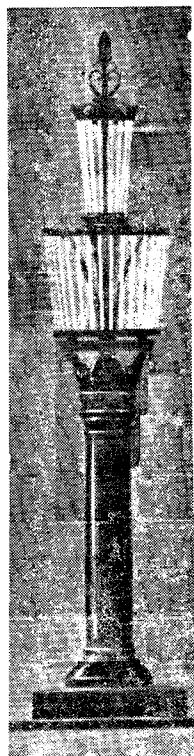


Рис. 8. Вариант оформления фонаря с люминесцентными лампами Архитектурного управления Мосгорисполкома.

литературным данным 600 час. Испытаниям подверглись одновременно лампы в теплоизоляционных рубашках и без изоляции, что давало возможность судить о влиянии тепловой изоляции на срок службы ламп. Лампы испытывались при колебании температуры воздуха от  $t_a = 10^\circ\text{C}$  до  $t_a = +15^\circ\text{C}$ .

Результаты испытаний представлены на рис. 7, где по оси абсцисс отложено число часов горения, а по оси ординат — относительное изменение светового потока ламп, измеренное при стационарном электрическом и тепловом их режиме. Из полученных результатов видно, что полный и полезный срок службы люминесцентных ламп при работе на открытом воздухе намного превышает предельное значение нормального срока службы для данного цикла включений. Результаты испытаний показывают также, что при данном режиме эксплуатации срок службы ламп с тепловой изоляцией почти не отличается от срока службы для открытых ламп.

Проведенные исследования не могут, понятно, служить исчерпывающим материалом для суждения о сроке службы люминесцентных ламп в различных режимах горения. Полное решение во-

проса может быть получено лишь путем длительных испытаний большого числа ламп на опытных участках. Однако приведенные материалы, несомненно, указывают на отсутствие резких изменений эмиссионного режима электродов ламп при их работе в условиях низких температур. В силу этого можно сделать вывод о достаточной длительности срока службы ламп с тепловой изоляцией при использовании их в установках наружного освещения.

В настоящее время на основании полученных Академией результатов запроектирована опытная установка с люминесцентными лампами. Для этой цели разработаны различные варианты оформления фонарей с этими лампами, один из них представлен на рис. 8.

### Литература

1. Я. Б. Зильберблат. Применение люминесцентных ламп в условиях низких температур. Известия АН СССР, Отделение технических наук, № 3, 1951.

2. А. П. Иванов. Электрические источники света. Госэнергоиздат, 1948.

[27. 10. 1952]



## Измерение напряженности поля, используемого для диэлектрического нагрева

**Инж. С. Ф. РАШКОВСКИЙ**

*Физико-технический институт Академии наук Литовской ССР*

В поточном производстве при высокочастотном нагреве тонких листов и пленок часто применяются электроды сложной формы и сложного взаимного расположения, конфигурация поля вокруг которых изучена мало. Настоящая работа, возникшая в связи с исследованием высокочастотных полей вблизи электродов разной формы, ставила своей целью получить доступными в производственных условиях средствами картину конфигурации поля между электродами и вокруг них, знание которой содействует более полноценному использованию высокочастотной энергии при диэлектрическом нагреве.

**Метод измерений.** Измерение напряженности электрического поля по точкам в пространстве вблизи электродов нами осуществлено применением метода нагрева термометра, предложенного Л. И. Мандельштамом и разработанного М. А. Дивильковским и М. И. Филипповым. Метод основан на измерении скорости нагревания термометра с ртутью в переменном магнитном поле и термометра с поляризующейся жидкостью — в электрическом, т. е. на измерении выделяющейся при этом, отдельно в обоих случаях, мощности. Такое

термометрическим методом — по скорости нагревания поляризующейся жидкости — измерено распределение напряженности и получены конфигурации высокочастотных электрических полей вокруг стержневых электродов гребенчатой формы применительно к нагреву тонких материалов, диэлектрический нагрев которых в поле между пластинами конденсатора является невыгодным.

Прямое измерение диэлектрических потерь делает возможным сравнительно точное измерение напряженности в данной точке поля, не искажая его заметно, так как метод исключает использование какой-либо аппаратуры, приборов, подводящих проводов к ним и т. п. что обычно вносит трудно учитываемые искажения [Л. 4].

Резервуару термометра была придана симметричная, по возможности сферическая, форма. В верхней части капилляр снабжен воронкой (рис. 1), через которую термометр наполнялся этиловым спиртом. Подвешивание термометра осуществлялось двумя шнурками, захлестнутыми на капилляр и натянутыми в свою очередь между другими двумя шнурками таким образом, чтобы резервуар термометра можно было весьма просто установить в любой точке пространства.

Измерения производились отсчетом по секундомеру при непосредственном наблюдении с расстояния нескольких метров в зрительную трубу теодолита скорости движения мениска жидкости. Секундомер включался одновременно с генератором и фиксировалось время прохождения мениском определенного числа делений шкалы.

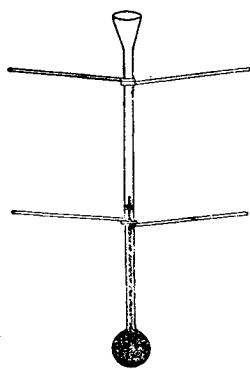


Рис. 1.

в зрительной трубе. Выдержка между двумя смежными измерениями составляла от 5 до 10 мин., что необходимо было для того, чтобы термометр принял вновь исходную комнатную температуру. При условии равенства этих исходных температур и если время наблюдения не превышает 10...15 сек суммарные потери в воздухе и в капилляре, а также потери на нагревание жидкостью стекла

резервуара термометра не превышают 10% [Л.1]. Применение теодолита для наблюдения скорости поднятия мениска позволяло фиксировать одновременно местоположение в пространстве измеряемой точки поля, давая координаты по двум осям выбранной системы координат. Третья координата определялась при помощи отвеса, подвешенного на ниточке, приклеенной к нижней части резервуара термометра. Отвес скользил по разграфленной бумаге, разостланной на полу.

Источником высокой частоты служил генератор, собранный по двухтактной схеме на двух лампах типа ГК-3000, он же мог работать на двух лампах типа ГУ-150. Аноды ламп питались от шестифазного выпрямителя, собранного на газотронах типа ВГ-236.

**Градуировка термометров.** Потери тепла в стекло и в воздух, конечно возрастают вместе с температурой жидкости. Через некоторое время после включения генератора начинает устанавливаться равновесие и жидкость термометра поднимается все медленнее и медленнее, пока не остановится. Очевидно, чем сильнее поле, тем выше установившаяся температура, следовательно, всякое изменение напряженности поля приводит к изменению установившейся температуры термометра. По установившейся равновесной температуре оказалась удобным измерять напряженность в области слабых полей. Для применяющихся нами термометров, наполненных этиловым спиртом, при длине волны  $\lambda = 3,28 \text{ м}$ , слабое поле с напряженностью ниже 20 в/см измерялось по равновесной температуре.

Например, один из употребляющихся нами термометров<sup>1</sup>, наполненный подкрашенным этиловым спиртом, имел шарообразный резервуар диаметром 10,2 мм и капиллярную трубочку длиной 128 мм. Его чувствительность при сравнении с ртутным термометром, с ценой деления шкалы в  $0,1^\circ\text{C}$ , оказалась  $0,11^\circ$  на 1 мм и одинаковой по всей длине капилляра.

Помещая резервуар термометра в измеряемое место поля, определяли время  $\tau$ , потребное для повышения температуры спирта вследствие диэлектрических потерь на  $\Delta T$ . В зависимости от напряженности поля, в наших измерениях задавались

значениями  $\Delta T$ , равными от 1 до  $0,1^\circ$ , с таким расчетом, чтобы время  $\tau$  не превышало 15 сек. Расчет производили по формуле

$$E_0^2 = \frac{502 \cdot \lambda Q \Delta T}{\epsilon'' \tau},$$

получаемой из сопоставления выражений для мощности, выделяющейся в жидкости, и мощности, поглощаемой единицей объема жидкости при повышении температуры на  $\Delta T$  за время  $\tau$  [Л. 2]. В формуле:  $\lambda$  — длина волны в воздухе, см;  $Q$  — теплоемкость этилового спирта и  $\epsilon''$  — мнимая часть диэлектрической постоянной спирта  $\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$ . Для наших расчетов было принято  $\epsilon'' = 1,4$ . Градуировочная кривая отвечала формуле:

$$E_0^2 = 6,7 \cdot 10^4 \frac{\Delta T}{\tau}. \quad (1)$$

Полученные этим методом значения напряженности поля в системе из двух параллельных проводов, обычно больше значений  $E_0$ , вычисленных теоретически [Л. 2]. Причину более быстрого роста напряженности поля приближении к проводам, чем следует по расчету, объясняют тем, что заряды, наводимые в жидкости термометра, влияют, в свою очередь, на распределение зарядов по поверхности ближайшего провода, как бы притягивая их. Это вызывает увеличение поля в жидкости тем сильнее, чем термометр ближе к проводу. Поэтому при градуировке не следует помещать резервуар термометра слишком близко к проводам.

**Результаты измерений.** Система электродов гребенчатой формы<sup>2</sup> [Л. 5] (рис. 2) была выполнена из латунных трубок диаметром  $4 \times 6 \text{ мм}$ , длиной 60 см с расположением стержней на расстоянии 75 мм между их центрами и в один ряд в горизонтальной плоскости. Всего девять стержней. При данных соотношениях между размерами стержней, их числом, расстоянием между ними и длине волны  $\lambda = 3,28 \text{ м}$  вся система настраивалась в резонанс при помощи конденсаторов связи. Измерения производились термометром с указанными выше данными. Амплитуда напряженности электрического поля определялась по формуле (1). Ограниченнная мощность используемого нами генератора, работавшего на лампах ГУ-150, позволяла получать наибольшие значения напряженности поля, в 140—150 в/см, тем не менее этого было достаточно для изображения картины распределения поля вокруг системы электродов гребенчатой формы. Напряженность поля измерялась в пространстве вокруг стержней в точках, расположенных в плоскостях, вертикально секущих систему электродов (рис. 2). Эти плоскости отмечены буквами АБ, ВГ, ДЕ, ЖЗ и КЛ.

Для преодоления трудностей, связанных с изображением поля в трех измерениях, поле показа-

<sup>2</sup> Система электродов гребенчатой формы для нагрева тонких пленок показана на фиг. 5... 10 книги А. Н. Мазина, А. В. Нетушила, А. Н. Парини „Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников“. Госэнергоиздат, 1950.

<sup>1</sup> В производственных условиях можно с не меньшим успехом использовать любой спиртовой термометр.

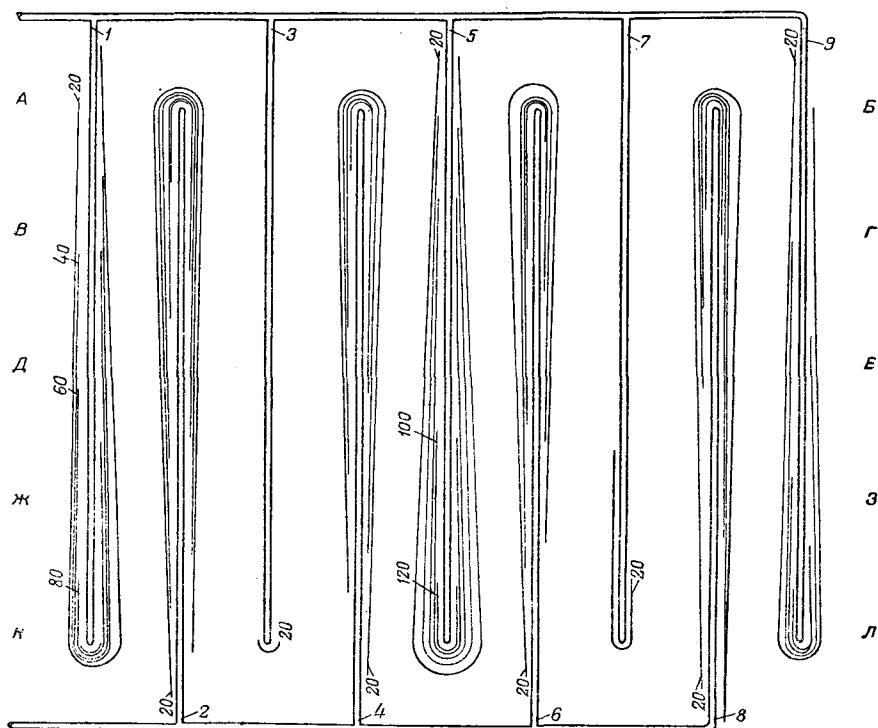


Рис. 2.

но в двух взаимно перпендикулярных плоскостях — горизонтальной и вертикальной. На рис. 2 и 3 поле изображено изолиниями, проведенными через точки с одинаковыми значениями напряженности. На этих же рисунках изолинии, наиболее удаленные от стержней, соответствуют полулю с напряженностью, равной  $20 \text{ в/см}$ , следующие более близкие к стержням изолинии соответствуют полулю с напряженностью  $40 \text{ в/см}$ , следующие —  $60 \text{ в/см}$ , затем —  $80 \text{ в/см}$  и т. д. На рис. 2 поле изображено в горизонтальной плоскости, проходящей по осям стержней системы, а на

Рассматриваемый метод измерения напряженности высокочастотного поля можно с успехом применить до частот  $500 \text{ кГц}$  на генераторах, обычно используемых в производственной практике для диэлектрического нагрева, например, типа ГС-48. В сторону более низких частот возможны затруднения, связанные с уменьшением мощности, выделяемой в жидкости термометра. Также возможны затруднения и при частотах, когда длина волны соизмерима с размерами резервуара термометра.

При наличии нагреваемого, хотя и тонкого,

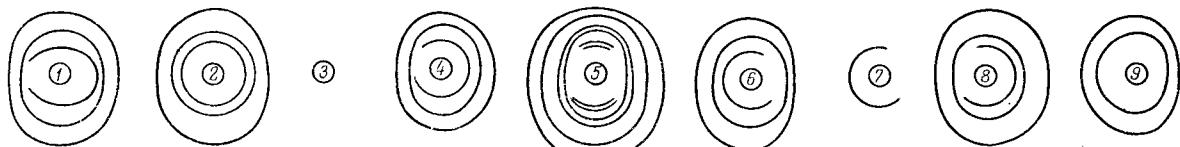


Рис. 3.

рис. 3 — в вертикальной плоскости, секущей систему в направлении  $DE$ . На рис. 2 видно, что напряженность поля вокруг стержней увеличивается в направлении к свободным их концам, что наблюдается также и вдоль стержней 3 и 7, вокруг которых поле значительно слабее. Очевидно, что это результат стоячей волны. Генератор подключался на расстоянии  $1 \text{ м}$ , считая от первого стержня системы. Размеры стержней системы и их взаимное расположение даны выше. Конечно, соответствующим подбором числа стержней, их длины, расстояний между ними, генерируемой частоты и т. д. систему можно настроить так, чтобы избежать наличия таких «холостых» стержней.

материала поле значительно искажается и не может быть достаточно точно измерено по предложенному методу, так как внесение термометра приведет к изменению поляризации материала, а материал изменит условия охлаждения термометра.

Все же теоретические расчеты [Л. 3], в сочетании с данными измерения свободного поля позволяют составить более ясное представление о закономерностях, имеющих место при диэлектрическом нагреве в материалах, и тем самым предвидеть характер нагрева в различных производственных процессах.

**Выводы.** 1. Метод измерения высокочастотного электрического поля по скорости нагревания

поларизующейся жидкости позволяет сравнивать простыми средствами исследовать поля по точкам в пространстве вокруг электродов и получить их конфигурацию.

2. Конфигурация поля вокруг стержней гребенчатой формы дает основание полагать, что подобные поля могут способствовать получению равномерного диэлектрического нагрева материалов при условии их движения относительно стержней. Это движение может быть связанным или с технологическим процессом производства, или с искусственно создаваемым качательным движением материала относительно стержней. Сравнительно большие расстояния между стержнями и их цилиндрическая форма с закругленными концами позволяют применять большие напряжения, не опасаясь искрового разряда. Ввиду значительного снижения опасности искрового разряда и возможности применения больших напряжений могут применяться частоты, соответствующие более длинным волнам, что упрощает использова-

ние высокочастотной энергии. Вследствие малой емкости, создаваемой подобной системой стержней, их число можно значительно увеличить. Изготовление такой стержневой системы электродов гребенчатой формы легко осуществимо в практике.

### Литература

1. М. А. Дивильковский и М. И. Филиппов. Определение диэлектрических потерь в жидкостях при высокой частоте. ЖТФ, № 1, 1936.
2. М. А. Дивильковский и М. И. Филиппов. Измерение напряженности поля высокой частоты. ЖТФ, № 5, 1940.
3. А. В. Нетушил. Некоторые задачи теории высокочастотного нагрева. Электричество, № 8, 1952.
4. А. В. Нетушил и А. А. Лысенков. Измерение температур диэлектриков и полупроводников в полях высокой частоты. Электричество, № 2, 1953.
5. А. Н. Мазин, А. В. Нетушил и Е. П. Парини. Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников. Госэнергоиздат, 1950.

[26. 10. 1953]



## Постоянные магниты из порошков

*Кандидат техн. наук А. Б. АЛЬМАН*

*Научно-исследовательский институт МРПП*

Методы порошковой металлургии [Л. 1...3] заняли прочное место в производстве постоянных магнитов. Сейчас известны четыре группы магнитов из порошков: 1) металлокерамические магниты; 2) металлопластичные магниты; 3) магниты, спрессованные из тонких ферромагнитных порошков; 4) оксидные магниты.

Магниты из порошков успешно используются в отечественной технике: в реле, гальванометрах, электросчетчиках и некоторых других приборах и аппаратах.

**Способы изготовления магнитов из порошков.** *Металлокерамические магниты.* Основной способ производства изделий из металлических порошков получил название «металлокерамического»<sup>1</sup>. При этом способе прессовки из смеси порошков нужного состава подвергают нагреву в целях получения прочных металлических деталей. Этот процесс обработки называется «спеканием». Температура спекания  $T_c$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) обычно лежит в пределах:

$$\frac{2}{3} T_n < T_c < T_n,$$

где  $T_n$  — температура плавления основного компо-

<sup>1</sup> Термин возник ввиду сходства металлокерамической технологии и технологии керамических изделий, но керамика в качестве связующего вещества или для другой цели, как правило, в металлокерамических изделиях не используется.

5 Электричество, № 6.

нента смеси. Этим способом изготавливают магниты из многих магнитно-твёрдых металлических

сплавов. В производстве металлокерамических магнитов применяются два существенно различных технологических процесса.

В одном случае из порошков прессуются магниты в виде уже готовых, формованных изделий. Основные операции этого процесса: смешение порошков исходных металлов, прессование из смеси магнитов различной формы, спекание прессовок и термическая обработка спеченных полуфабрикатов.

С целью понижения пористости магнитов или исправления их формы и размеров часто магниты прессуются и спекаются дважды. Прессованные металлокерамические магниты требуют очень небольшой механической обработки или вовсе не нуждаются в ней.

Металлокерамические магниты также изготавливают путем предварительного прессования и спекания из смеси металлических порошков небольших сутунок с последующей их термической обработкой, прокаткой и штамповкой магнитов из прокатанных полос или листов.

Магниты, вырезанные из металлокерамического проката, практически не содержат пор. По магнитным свойствам они равноценны металлическим магнитам. Понятно, что этот способ применим только к пластичным сплавам, поддающимся обработке давлением.

Для прессования используются механические или гидравлические прессы. Спекание проводится в защитной среде: водороде, вакууме или атмосфере углеродсодержащих газов.

**Металлопластические магниты.** Металлопластический способ изготовления магнитов заключается в прессовании изделий в готовом виде из смеси порошков железо-никель-алюминиевых сплавов и полимеризующейся смолы. Смола играет роль связки. Наполнителем служат мелкоизмельченные железо-никель-алюминиевые сплавы, которые размалываются в шаровых мельницах. Размол производится после полной термической обработки, необходимой для обеспечения высоких магнитных свойств. Высокая хрупкость железо-никель-алюминиевых сплавов облегчает их размол. Прессовки пропитываются бакелитовым лаком и подвергаются слабому нагреву для полимеризации смолы. Металлопластические магниты имеют точные размеры и гладкую поверхность. Дополнительной механической обработки они не требуют.

**Оксидные магниты** прессуются из порошкообразных окислов металлов, смешанных в нужном соотношении, с последующим спеканием прессовок в окислительной атмосфере и термической обработкой спеченных изделий.

**Магниты из тонких порошков.** Магниты из тонкого порошка железа и из смеси тонких порошков железа и кобальта образуют новую область высококоэрцитивных материалов. Такие порошки состоят из частиц размером порядка 0,03 мкн. Порошки получают восстановлением муравьинокислого железа или смеси муравьинокислых солей железа и кобальта. Восстановление проводится в атмосфере водорода при умеренной температуре.

Магниты из тонких порошков прессуются в готовом виде. Иногда для повышения механической прочности их отжигают в водороде при низкой температуре, чтобы избежать коагуляции металлических частиц. Отжигом можно изменять и магнитные свойства магнитов. Отожженные магниты пропитываются бакелитовым лаком с целью дополнительного повышения их прочности и для защиты от коррозии.

**Некоторые особенности структуры и свойства.** Металлокерамические магниты по своей структуре тождественны магнитам из обычных металлургических сплавов. Магнитные свойства металлокерамических и металлургических сплавов в процессе обработки подчиняются одним и тем же закономерностям.

Различие в свойствах главным образом вызывается повышенной пористостью металлокерамических сплавов. Поры, действуя как неферромагнитные включения, снижают магнитную энергию и остаточную индукцию сплавов (рис. 1). Поэтому металлокерамические магниты должны иметь возможно меньше пор. На величину коэрцитивной силы поры не влияют. Обычно прессованные металлокерамические магниты содержат от 3 до 8% пор. Прокатка металлокерамических сплавов позволяет выпускать магниты практически без пор.

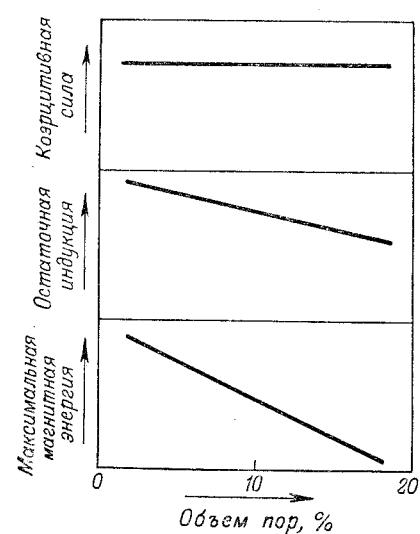


Рис. 1. Схематическое изображение влияния концентрации пор на магнитные свойства постоянных магнитов.

Спекание — одна из наиболее ответственных операций в изготовлении металлокерамических магнитов. Условия спекания должны обеспечить взаимную диффузию компонентов системы. Чаще всего это достигается нагревом до температуры, близкой к точке плавления сплава.

Для получения высоких магнитных свойств металлокерамические магниты должны подвергаться той же термической обработке (закалке и т. д.), что и магниты из металлургических сплавов.

**Металлопластические магниты** по структуре представляют конгломераты из частиц железо-никель-алюминиевых сплавов, соединенных между собой прослойками и включениями смолы. Такую структуру можно рассматривать как макрогетерогенную смесь из магнитно-твердой и неферромагнитной фаз. Как отмечалось, в таких системах магнитная энергия и остаточная индукция снижаются с ростом концентрации неферромагнитной фазы. Коэрцитивная сила при этом не изменяется. Однако при размоле железо-никель-алюминиевых сплавов величина коэрцитивной силы уменьшается. Это может быть объяснено наклепом [Л. 4].

**Оксидные магниты** примыкают к классу керамических изделий. Тем не менее, обсуждение их в группе материалов, изготовленных методами порошковой металлургии, оправдывается сходством технологий керамики и металлокерамики. Можно полагать, что магнитно-твердые оксидные материалы подобно металлическим сплавам для постоянных магнитов представляют гетерогенные системы. Высокая коэрцитивная сила оксидных материалов возникает вследствие превращения их в твердом состоянии по типу дисперсионного и диффузионного твердения.

**Магниты из тонких порошков** представляют конгломераты из высокодисперсных железных или железо-кобальтовых частиц, разделенных пленками и включениями окислов. Высокая коэрцитивная сила таких магнитов связы-

вается с однодоменным строением ферромагнитных частиц. По величине частицы тонких порошков сопоставимы с доменами (областями самоизменения намагниченности) ферромагнетиков.

Возможность действия маленьких ферромагнитных частиц, как постоянных магнитов, была впервые предсказана (1930 г.) в работе советских физиков Я. И. Френкеля и Я. Г. Дорфмана.

**Свойства постоянных магнитов из порошков.** Цифры табл. 1 характеризуют средний уровень свойств магнитов. Таблица составлена по результатам работ НИИ МРПП<sup>2</sup>, за исключением данных об оксидных магнитах, заимствованных из [Л. 5, 6]. На рис. 2 и 3 изображены кривые размагничивания и магнитной энергии постоянных магнитов из металлических порошков.

Металлокерамические железо-никель-алюминиевые магниты изготавливаются из разнообразных сплавов на основе системы железо-никель-алюминий, содержащих часто в качестве легирующих примесей также кобальт, медь, титан и некоторые другие металлы.

<sup>2</sup> В работах принимали активное участие инженеры: В. С. Дергунова, П. А. Гладышев, И. П. Мелашенко, В. Л. Мемелов, С. Х. Мухонкин, К. Саканель, В. Н. Соколова, А. С. Эйсирович.

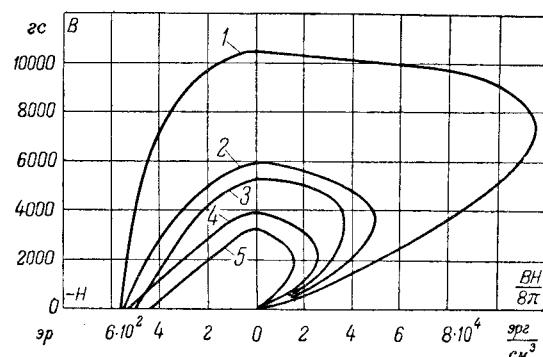


Рис. 2. Кривые размагничивания и магнитной энергии постоянных магнитов из металлических порошков.

1 — сплав магнико; 2 — аль нико; 3 — альни; 4 — аль нико (металлопластическая композиция); 5 — альни (металлопластическая композиция).

Все эти сплавы отличаются высокой твердостью и хрупкостью. Они не поддаются обработке давлением и резанием стальным и твердосплавным инструментом. Поэтому железо-никель-алюминиевые магниты прессуются в форме готовых изделий.

Метод прессования позволяет значительно уменьшить допуски на размеры магнитов (сравнительно с обычным методом фасонного литья) и резко сократить объем шлифовальных работ.

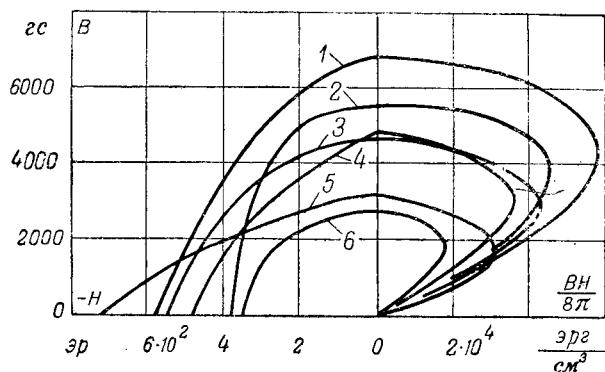
Таблица 1  
Постоянные магниты из порошков

Группа	Материал	Номинальный состав, %	$B_r$ , эс	$BH_c$ , эр	$\frac{B^*}{H} \cdot$ $\frac{зс/эр}{зс/эр}$	$\frac{(BH)_{\text{макс}}}{8\pi}$ $\times 10^{-3} \text{ эрг/см}^3$	$\mu_r^*$ , зс/эр	Плот- ность, з/см <sup>3</sup>	Механи- ческие свой- ства
Металлокерамические магниты	Альни	13Al, 25Ni, 4Cu, 58Fe	5 300	500	$\frac{3350}{270}$	36	5,8	6,7	Твердый, хрупкий
	Аль нико	10Al, 17Ni, 12,5Co, 6Cu, 54,5Fe	6 000	550	$\frac{3800}{330}$	50	5,2	6,8	
	Магнико**	8Al, 15Ni, 24Co, 3Cu, 50Fe	10 500	560	$\frac{7400}{390}$	115	5,6	7,0	
	Кунифе**	60Cu, 20Ni, 20Fe	5 400	390	$\frac{3900}{290}$	45	3,2	8,6	
	Кунифе	60Cu, 20Ni, 20Fe	2 700	360	$\frac{1800}{260}$	19	—	7,7	Мягкий, пластичный
	Кунико	48Cu, 23Ni, 29Co	3 200	730	$\frac{1700}{470}$	32	2,4	7,9	
	Кунико	35Cu, 24Ni, 41Co	4 700	550	$\frac{2800}{390}$	43	3,7	7,7	
	Co—Pt	23Co, 77Pt	4 300	4 700***	—	—	—	14,5	Мягкий, относитель- но пластич- ный
Металлопла- стические магниты	Ag—Mn—Al	86,8Ag, 8,8Mn, 4,4Al	450	5 000***	—	—	—	8,5	
	Альни	15Al, 24Ni, 4Cu, 57Fe	3 300	450	$\frac{2000}{200}$	16	3,2	5,1	Хрупкий
Магниты из тонких порош- ков	Аль нико	9Al, 20Ni, 15Co, 4Cu, 52Fe	3 900	530	$\frac{2300}{280}$	26	4,0	5,4	
	Fe	—	4 800	480	$\frac{3100}{280}$	34	4,2	4,3	Хрупкий
Оксидные магниты	Fe—Co	—	6 900	580	$\frac{4350}{340}$	59	4,3	4,5	
	Вектолит	30Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 44Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , 26Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	1 600	900	—	20	—	3,0	Хрупкий
	Феррокслюд	14BaO, 86Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2 000	1 500	$\frac{1030}{800}$	32	—	4,5	

\* В точке кривой размагничивания, соответствующей  $(BH)_{\text{макс}}$ .

\*\* Анизотропный материал.

\*\*\*  $H_c$  при  $I = 0$ .



Фиг. 3. То же, что на рис. 2.

1 — спрессованный тонкий порошок железо-кобальта; 2 — сплав кунифе (прокатанный); 3 — сплав кунико (35% Cu, 24% Ni, 41% Cr); 4 — спрессованный тонкий порошок железа; 5 — сплав кунико (48% Cu, 23% Ni, 29% Co); 6 — сплав кунифе (прессованный).

Обычные допуски на размеры железо-никель-алюминиевых металлокерамических магнитов даны в табл. 2.

**Таблица 2**  
**Допуски на железо-никель-алюминиевые**  
**металлокерамические магниты**

Размер, мм	Допуск, мм
До 5	± 0,15
От 5,1 до 15	± 0,20
От 15,1 до 30	± 0,25
От 30,1 до 50	± 0,35

Из-за наличия 3...8% пор металлокерамические магниты на 5...10% уступают литым магнитам по остаточной индукции и на 10...20% по магнитной энергии. По коэрцитивной силе металлокерамические магниты равны литым. Сплав магнико анизотропен. Максимальные магнитные свойства наблюдаются в направлении магнитного поля, накладываемого на магниты при их термической обработке. Сплавы альни и альнико — изотропны.

По механической прочности металлокерамические железо-никель-алюминиевые магниты, обладающие мелкозернистой структурой, превосходят литые магниты в 2...3 раза.

Медь-никель-кобальтовые, меди-никель-железный, кобальт-платиновый и серебро-марганец-алюминиевый сплавы относятся к числу деформируемых магнитно-твердых материалов.

Медь-никель-кобальтовые сплавы характеризуются невысокой твердостью. Эти сплавы изотропны. Они легко поддаются обработке резанием. На сжатие, при доперессовании, они работают удовлетворительно. Однако прокатка часто приводит к их разрушению. Поэтому металлокерамические медь-никель-кобальтовые магниты целесообразно прессовать в конечной форме.

По магнитным свойствам металлокерамические медь-никель-кобальтовые магниты равнозначны магнитам из соответствующих металлургических сплавов.

Медь-никель-железный сплав легко обрабатывается давлением и резанием как до, так и после термической обработки. При холо-

дной прокатке или протяжке сплав становится анизотропным. Максимальные магнитные свойства наблюдаются в направлении деформации. В нетекстуированном виде сплав имеет изотропные, но более низкие свойства.

Изотропные металлокерамические магниты из меди-никель-железного сплава должны прессоваться в конечной форме. Магниты с анизотропией свойств вырубаются штамповкой из прокатанных металлокерамических полос или листов.

Магнитам из металлокерамического проката свойственна хорошая поверхность, без дефектов, иногда встречающихся в металлургических холоднокатанных материалах.

Кобальт-платиновый сплав обладает весьма высокой коэрцитивной силой. Сплав обрабатывается давлением и резанием. Магниты обычно весят доли грамма. Они штампуются или вырезаются на пожницах из прокатанных полос.

Серебро-марганец-алюминиевые сплавы отличаются исключительной коэрцитивной силой при низких значениях остаточной индукции и магнитной энергии. Сплав можно обрабатывать давлением и резанием.

Концентрация смолы в металлопластических магнитах составляет около 25% по объему. Поэтому их остаточная индукция меньше остаточной индукции литых железо-никель-алюминиевых магнитов приблизительно на 30%. По коэрцитивной силе металлопластические магниты также несколько (на 5...10%) уступают литым. Магнитная энергия металлопластических магнитов составляет около 50% от магнитной энергии литых магнитов из сплавов аналогичного состава. Однако, так как металлопластические магниты легче литых, то при пересчете на единицу веса разница в энергии уменьшается.

Несмотря на пониженные по сравнению с литыми и металлокерамическими магнитами свойства, благодаря простой технологии производства в ряде случаев применение металлопластических магнитов вполне целесообразно.

Прочность металлопластических магнитов достаточно высока, чтобы их можно было применять не только в неподвижных, но и в быстро врачающихся системах. Предел прочности металлопластических магнитов при сжатии 1 200...1 500 кг/см<sup>2</sup>.

Оксидные магниты отличаются хрупкостью и низкой механической прочностью. Особенностью их являются низкий удельный вес и высокое удельное электросопротивление, свойственные керамическим материалам. Из магнитных характеристик заслуживает быть отмеченной довольно высокая коэрцитивная сила оксидных магнитов, особенно из сплава феррокслюд.

Магниты из тонких порошков еще мало изучены в практическом отношении. По магнитным свойствам магниты из железа приближаются к сплаву альни, а из медью-никель-кобальта (25...30% Co) к сплаву альнико. Плотность их невелика. Магниты хрупки и имеют невысокую механическую прочность. С точки зрения экономики магниты из железного порошка, как и оксидные

магниты ферроксдюр, не содержащие дефицитные цветные металлы, представляют большой интерес.

**Преимущества и ограничения.** Методы порошковой металлургии целесообразно применять при массовом или крупносерийном производстве мелких магнитов простой и сложной формы весом от долей грамма до примерно 100 г. С уменьшением размеров магнитов преимущества порошковой металлургии возрастают.

Многие магнитно-твердые сплавы содержат дорогие и дефицитные металлы, как платину, серебро, кобальт, никель, медь и др. Порошковая металлургия позволяет резко сократить потери и отходы при производстве таких сплавов.

При изготовлении магнитов из порошков облегчается точное получение заданного химического состава магнитно-твёрдого материала. Это позволяет повысить повторяемость свойств.

Основные ограничения при производстве магнитов из порошков связаны с размерами и формой магнитов. Вследствие низкой текучести металлических порошков и высокого удельного давления прессования изготовление крупных магнитов из порошков весом более 100 г затруднено. Для класса металлокерамических магнитов из металлических сплавов область наиболее благоприятного веса ограничена примерно 30 г.

Трудности, которые не всегда удается преодолеть, вызывают прессование магнитов, имеющих неодинаковую высоту в разных частях или по-перечные пазы и отверстия. Другие ограничения обусловлены потребностью в специализированном оборудовании и инструменте (автоматических прессах, печах с защитной атмосферой и т. д.) и сравнительно высокой стоимостью исходных металлических порошков.

Тем не менее в ряде случаев производство металлических магнитно-твёрдых сплавов из порошков имеет несомненные преимущества перед обычной металлургической технологией. Например, в случае небольших магнитов, весом до 30 г, из твердых и хрупких сплавов на основе системы железо-никель-алюминий использование металлокерамического метода позволяет поднять производительность процесса, резко увеличить выход годного металла, сократить брак, уменьшить загрузку шлифовальных станков.

При изготовлении кобальт-платиновых магни-

тов по металлокерамической технологии отпадает необходимость в высокотемпературных плавильных печах, устраняются потери ценных металлов, обусловленные угаром и литейными отходами.

Некоторые высококоэрцитивные материалы из порошков (металлопластические композиции, магниты из тонких порошков, оксидные магниты) имеют физические и химические свойства, как электросопротивление, плотность, коррозиостойчивость и др., иного порядка, чем обычные металлургические магнитно-твёрдые сплавы. Это может сделать применение их в отдельных конструкциях весьма ценным.

**Заключение.** Современные магниты из порошков могут изготавливаться из разнообразных сплавов и композиций. Использование методов порошковой металлургии позволило разработать ряд новых по химическому составу и технологии изготовления материалов для постоянных магнитов.

Свойства магнитов из порошков изменяются в широком диапазоне.

Опыт применения магнитов из порошков говорит о целесообразности их внедрения в технику. Конструкторы и технологи должны шире применять такие магниты в своих разработках. Возможность использования магнитов из порошков должна рассматриваться в каждом отдельном случае с учетом как их преимуществ, так и недостатков. Следует иметь в виду, что частое замена металлургических магнитов магнитами из порошков требует изменения конструкции узла прибора или аппарата.

Применение наряду с металлургическими магнитами магнитов из порошков, несомненно, открывает новые возможности для советской техники.

### Литература

1. М. Ю. Бальшин. Порошковое металлоедение. ОНТИ, 1948.
2. М. Ю. Бальшин. Порошковая металлургия. Машгиз, 1948.
3. C. G. Goetzel. Treatise on Powder Metallurgy, N. Y., t. I, 1949; t. II, 1950; t. III, 1952.
4. А. Б. Альтман, В. Л. Мемелов и Л. Ш. Казарновский. ЖТФ, стр. 560—566, № 5, 1949.
5. R. M. Bosorth. Ferromagnetism, стр. 873, 1951.
6. F. G. Brockman Electrical Engineering, стр. 644—647, июль, 1952.

[4.2.1954]



# Выбор толщины диэлектрика для бумажных силовых конденсаторов

Кандидат техн. наук Г. С. КУЧИНСКИЙ, доктор техн. наук В. Т. РЕННЕ  
и кандидат техн. наук В. М. ФАЙНИЦКИЙ

Ленинградский политехнический институт им. Калинина  
Научно-исследовательский институт постоянного тока МЭС

Помимо свойств материалов и рационального выбора режимов технологии, для качества конденсаторов очень большое значение имеют выбор толщины диэлектрика и допускаемая напряженность электрического поля  $E_p$ .

В промышленных конденсаторах на номинальное рабочее напряжение от 1 000 в и выше применяются стандартные секции на 1 000 в, в которых  $E_p = 12,5 \text{ кв/мм}$ . В этих секциях толщина диэлектрика составляет в среднем 80 мкм: 7 ... 8 слоев бумаги по 10 ... 12 мкм. Эта толщина диэлектрика соответствует максимуму на кривой зависимости кратковременной электрической прочности  $E_n$  бумажно-масляного конденсатора от толщины диэлектрика (рис. 1). Запас прочности при кратковременном воздействии напряжения достаточно велик:  $\frac{E_n}{E_p} \approx 10$ .

Однако в эксплуатации все еще наблюдаются случаи преждевременного пробоя конденсаторов.

Известно, что бумажно-масляная изоляция стареет при длительном воздействии напряжения и длительная электрическая прочность заметно ниже кратковременной [Л. 3]. Основной причиной старения бумажно-масляных конденсаторов при переменном напряжении следует

предложить при выборе толщины диэлектрика бумажного силового конденсатора, кроме электрической прочности, учитывать также ионизационные характеристики. Показано, что можно достичь улучшения ионизационных характеристик стандартных силовых конденсаторов путем снижения толщины диэлектрика.

считать развитие ионизационных процессов, зарождающихся в остаточных газовых включениях. Поэтому для обеспечения надежной работы надо выбирать  $E_p$  с таким расчетом, чтобы выполнялось условие  $E_p < E_u$ , где  $E_u$  — напряженность поля, при которой начинается развитие ионизации. Представляет поэтому большой практический интерес разработать точную методику определения градиента  $E_u$  и изыскать возможности улучшения этой характеристики.

Развитие идеи, предложенной К. С. Архангельским, по обнаружению начала ионизации путем регистрации появления высших гармоник в кривой тока, протекающего через диэлектрик, привело к созданию высокочувствительных установок, позволяющих надежно определять значение  $E_u$  для секций бумажно-масляных конденсаторов емкостью до 1 ... 2 мкф [Л. 5]. Измерения, проведенные нами с помощью этих установок, показали, что в промышленных бумажно-масляных конденсаторах отношение  $E_u$  к  $E_p$  составляет около 3. Таким образом, конденсаторы имеют, как будто, достаточно большой запас и по напряжению начала ионизации. Вместе с тем известно, что конденсаторы все же иногда пробиваются преждевременно, и размотка пробитых секций неопровергнуто доказывает, что причиной пробоя было развитие ионизации [Л. 6]. Пришлося прийти к заключению, что в процессе эксплуатации напряжение начала ионизации, первоначально достаточно высокое, может снижаться затем до уровня рабочего напряжения. Проведенные нами исследования показали, что основной причиной снижения в эксплуатации напряжения начала ионизации является воздействие перенапряжений, превышающих начальное значение ионизирующего напряжения.

На рис. 2 для стандартной секции на 1 000 в показана зависимость напряжения начала ионизации от числа перенапряжений различной кратности; продолжительность каждого отдельного перенапряжения составляет 0,2 сек, перерывы —

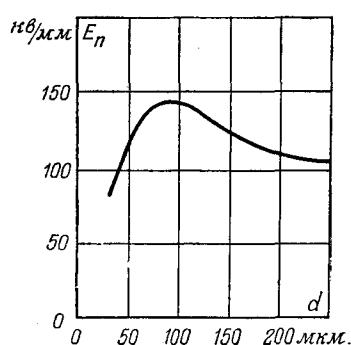


Рис. 1. Кратковременная пробивная напряженность бумажно-масляных конденсаторов в зависимости от толщины диэлектрика (60 гц).

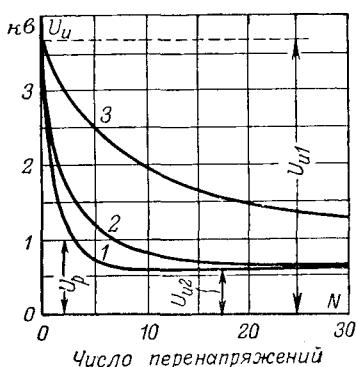


Рис. 2. Ионизирующее напряжение стандартных секций силовых конденсаторов в зависимости от числа перенапряжений различной кратности. Длительность воздействия 0,2 сек, перерывы 30 сек, толщина диэлектрика 80 мкм.

1 — 7-кратные перенапряжения; 2 — 5-кратные; 3 — 4-кратные.

по 30 сек. Опыт показывает, что воздействие кратковременных перенапряжений может снижать ионизирующее напряжение до уровня, лежащего ниже номинального рабочего значения (рис. 2). Обнаружено некоторое минимальное значение напряжения начала ионизации, ниже которого оно не снижается при любом числе перенапряжений любой кратности. При толщине диэлектрика 80 мкм это напряжение равно 550...600 в, что значительно ниже номинального рабочего напряжения 1 000 в.

Таким образом, величина ионизирующей напряженности  $E_u$  может иметь два значения: начальное  $E_{u1}$ , соответствующее конденсатору, не бывшему еще в эксплуатации, и минимальное  $E_{u2}$ , которое может быть достигнуто в условиях эксплуатации при воздействии перенапряжений, создающих в изоляции напряженность поля, превышающую значение  $E_{u1}$ . При толщине изоляции 80 мкм средние значения следующие:  $E_{u1} = 37,5 \dots 45 \text{ кВ/мм}$  и  $E_{u2} = 7 \dots 7,5 \text{ кВ/мм}$ .

Интересно отметить, что минимальное значение ионизирующей напряженности в бумажно-масляных конденсаторах оказывается того же порядка, что и у конденсаторов с твердой пропиткой, и близко к тем значениям, которые можно наблюдать у сухих непропитанных секций. Это значение напряженности, повидимому, соответствует толщине газового включения, равной зазору между обкладкой и первым прилегающим к ней слоем бумаги.

Можно полагать, что начальное значение ионизирующего напряжения определяется максимальным размером остаточных газовых включений, сохранившихся в диэлектрике после пропитки, и зависит от остаточного давления (размера вакуума), достигнутого в процессе пропитки. При воздействии перенапряжений, превышающих значение  $E_{u1}$ , за счет выделения газов при разложении масла в процессе кратковременной ионизации размеры газовых включений начинают расти, и ионизирующее напряжение соответственно снижается. Это снижение прекращается, когда толщина газового включения до-

стигнет максимального возможного значения, т. е. сделается равной величине зазора между обкладкой и бумагой. При дальнейшем развитии процесса ионизирующее напряжение сохраняет неизменное значение, а интенсивность ионизации возрастает вместе с ростом площади газовых включений при неизменной их толщине. Спустя некоторое время можно будет обнаружить наличие ионизации по возрастанию угла потерь, а позднее — по газовыделению, заметному для невооруженного глаза.

Если механизм развития процесса ионизации в диэлектрике бумажного конденсатора можно считать достаточно ясным, то начальная стадия процесса требует дополнительного изучения. Можно полагать, в частности, что процесс ионизации начинается у края фольги, т. е. в области повышенного градиента, и затем уже распространяется в зазор между фольгой и первым слоем бумаги. Также возможно, что в начальной стадии процесс связан с развитием скользящих разрядов у краев фольги. Дальнейшие исследования могут, вероятно, пролить свет на этот вопрос.

Во всяком случае приходится констатировать, что современные конденсаторы при большом запасе по величине начальной ионизирующей напряженности  $E_{u1}$  имеют минимальное значение ионизирующей напряженности  $E_{u2}$ , лежащее значительно ниже рабочей напряженности  $E_p$ . Поэтому батареи конденсаторов, работающие в сетях, где перенапряжения незначительны, должны иметь достаточно большой срок службы. В сетях, где имеют место значительные перенапряжения, превосходящие верхний уровень ионизирующего напряжения конденсаторов, появляется возможность падения ионизирующего напряжения до нижнего уровня, развития ионизации при рабочем напряжении и преждевременного выхода из строя многих конденсаторов.

На рис. 3 показано развитие процесса ионизации (возрастание угла потерь) в конденсаторе, у которого напряжение начала ионизации было в начале опыта снижено на 400 в по сравнению с рабочим напряжением. Спустя 30 суток конденсатор пробился.

Для повышения надежности силовых конденсаторов следует повысить их стойкость к воз-

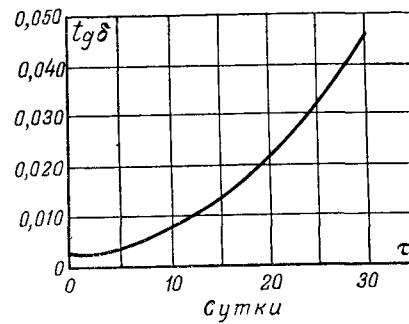


Рис. 3. Рост угла потерь бумажно-масляного конденсатора во времени в процессе развития ионизации ( $U_p$  на 400 в больше  $U_u$ ).

действию перенапряжений с таким расчетом, чтобы при перенапряжениях, наблюдающихся в эксплуатации, ионизирующее напряжение не снижалось до уровня рабочего напряжения.

Одним из способов повышения ионизационной стойкости бумажного конденсатора является

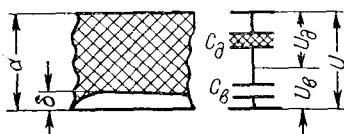


Рис. 4.

ся рациональный выбор толщины диэлектрика секции, так как известно, что напряженность начала ионизации зависит от толщины диэлектрика [Л. 7]. При снижении толщины следует ожидать возрастания ионизационной напряженности. Это можно показать следующими теоретическими соображениями, иллюстрирующими качественную сторону явления.

Представим себе диэлектрик с газовым включением в виде двух последовательно включенных емкостей (рис. 4):  $C_b$  — соответствует включению, а  $C_d$  — здоровой части диэлектрика. Обозначим толщину включения  $\delta$ , а суммарную толщину диэлектрика  $d$ . Соответствующие значения диэлектрических проницаемостей обозначим  $\epsilon_b$  и  $\epsilon_d$  ( $\epsilon_b = 1$ ). Если предположить, что газовое включение расположено параллельно обкладкам и при относительно большой площади толщина его мала, то в первом приближении поле можно считать однородным. Обозначим полное напряжение через  $U$ , а его составляющие на емкостях  $C_b$  и  $C_d$  — через  $U_b$  и  $U_d$ . Тогда

$$U = U_b + U_d; \frac{U_d}{U_b} = \frac{C_b}{C_d} = \frac{\epsilon_b (d - \delta)}{\epsilon_d \cdot \delta}.$$

Далее,

$$U = U_b + U_b \frac{\epsilon_b (d - \delta)}{\epsilon_d \cdot \delta}.$$

Разделив на  $d$ , получаем:

$$E = \frac{U_b}{d} \left( 1 + \frac{(\epsilon_d - 1) \delta}{\epsilon_d \cdot \delta} \right).$$

После несложных преобразований будем иметь:

$$E = \frac{U_b}{\epsilon_d \cdot \delta} \left[ 1 + \frac{(\epsilon_d - 1) \delta}{d} \right].$$

$E = E_u$ , когда напряжение на газовом включении достигнет  $U_{eu}$  — значения, при котором начнется ионизация в этом включении:

$$E_u = \frac{U_{eu}}{\epsilon_d \cdot \delta} \left[ 1 + \frac{(\epsilon_d - 1) \delta}{d} \right]. \quad (1)$$

Выражение (1) показывает, что ионизирующая напряженность конденсатора должна расти при снижении суммарной толщины диэлектрика, если толщина газового включения неизменна или мало изменяется.

Как указано выше, основной областью развития ионизации является, повидимому, зазор между обкладкой и диэлектриком, который мало зависит от толщины диэлектрика. Поэтому предположение о постоянстве  $\delta$  при изменении  $d$  достаточно правдоподобно. При постоянном  $\delta$  можно считать постоянным и  $U_{eu}$ .

Проведенные нами опыты подтвердили, что при уменьшении толщины диэлектрика растут как начальное, так и минимальное значения ионизирующей напряженности бумажно-масляного конденсатора (рис. 5). Опыты проводились с конденсаторными секциями с разной толщиной диэлектрика, изготовленными на заводе из бумаги нормальной плотности и прошедшими нормальный заводской процесс сушки и пропитки. На рис. 5 показаны средние данные, полученные для десяти одинаковых секций емкостью по 1,5 мкФ для каждого значения толщины диэлектрика. Разброс значений ионизирующего напряжения до воздействия перенапряжений показан на рис. 6.

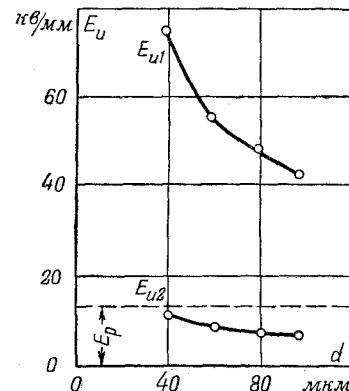


Рис. 5. Начальная  $E_{u1}$  и минимальная  $E_{u2}$  ионизирующие напряженности в зависимости от толщины диэлектрика.

Аналогичные результаты, подтверждающие возрастание ионизирующей напряженности с уменьшением толщины диэлектрика, были получены и на опытных секциях, изготовленных Конденсаторным отделом ІПИ (рис. 7). В этом опыте применялся более глубокий вакуум при пропитке, что объясняет несколько более высокие значения начальной напряженности по сравнению с данными рис. 5.

На рис. 8 показано влияние толщины диэлектрика в секциях на их стойкость к перенапряжениям длительностью 0,2 сек. По оси ординат отложено отношение ионизирующего напряжения к номинальному рабочему напряжению, полученному путем умножения толщины диэлектрика на постоянное значение  $E_p = 12,5$  кВ/мм.

Данные рис. 8 показывают, что с уменьшением толщины диэлектрика не только возрастает запас по начальному напряжению ионизации, но и заметно улучшается стойкость к воздействиям перенапряжений. Так, при толщине 96 мкм начальный запас по напряжению ионизации со-

щине 84 мкм (толщина диэлектрика в стандартных секциях). Данные рис. 9 показывают, что при снижении толщины до 50...60 мкм можно достичь увеличения ионизирующей напряженности на 30...40%, в то время как снижение кратковременной прочности будет менее

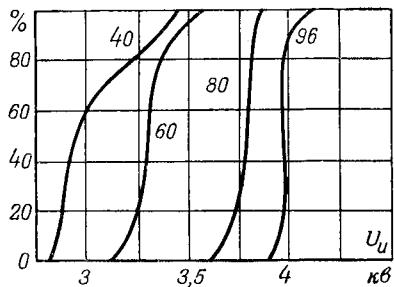


Рис. 6. Разброс начальных значений ионизирующей напряженности при различных толщинах диэлектрика (значения толщин указаны на рисунке, микрометры).

храняется только до кратности перенапряжений, равной 3, а при толщине 40 мкм — до кратности 5.

Кривые рис. 8 получены для заводских секций, за исключением кривой 2, соответствующей толщине 50 мкм. Кривая 2 получена для секций, изготовленных в ЛПИ при более высоком вакууме, чем объясняется ее относительно более благоприятный ход.

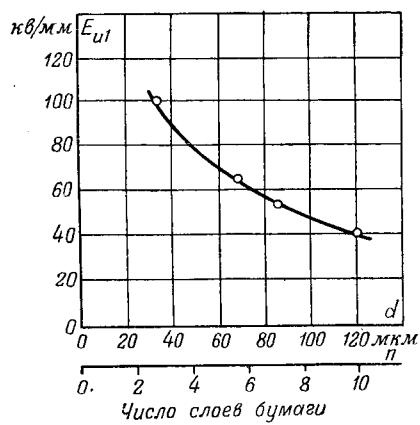


Рис. 7. Начальная ионизирующая напряженность в зависимости от толщины диэлектрика (числа слоев бумаги) для секций лабораторного изготовления.

Приведенные здесь данные показывают, что толщина диэлектрика в стандартных секциях не является оптимальной, и ее следует снизить для повышения ионизационной устойчивости конденсатора. Снижение толщины надо провести с таким расчетом, чтобы не вызвать опасного уменьшения запаса кратковременной электрической прочности. На рис. 9 сопоставлены относительные изменения ионизирующей напряженности и кратковременной прочности при изменении толщины диэлектрика для опытных секций с площадью обкладок 10 000 см<sup>2</sup>; за 100% приняты значения исследуемых характеристик при тол-

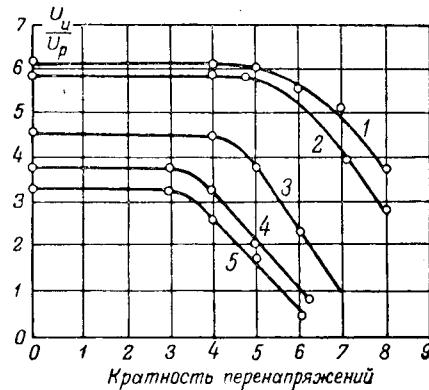


Рис. 8. Запас ионизационной прочности секций с различной толщиной диэлектрика в зависимости от кратности перенапряжений продолжительностью 0,2 сек.

1 — толщина 40 мкм, номинальное напряжение 500 в; 2 — 50 мкм и 625 в; 3 — 60 мкм и 750 в; 4 — 80 мкм и 1000 в; 5 — 96 мкм и 1200 в.

15...20%. Еще большее возрастание  $E_u$  можно получить при переходе к толщине 40 мкм, но при этом среднее значение  $E_n$  снижается более чем на 30...40% и появляются отдельные значения  $E_n$ , резко сниженные по сравнению со средним.

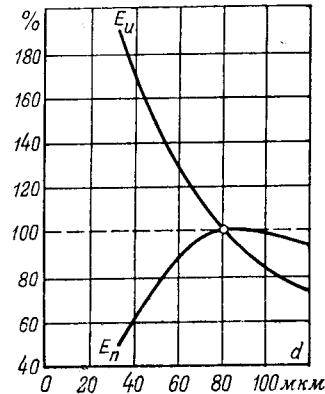


Рис. 9. Относительные изменения ионизирующей напряженности  $E_u$  и кратковременной электрической прочности  $E_n$  в зависимости от толщины диэлектрика бумажно-масляного конденсатора.

При толщине 50 мкм нижняя граница ионизирующей напряженности повышается от 7...7,5 до 10...10,5 кВ/мм, но это все же меньше принятой сейчас рабочей напряженности 12,5 кВ/мм. Таким образом, мы не получаем абсолютной гарантии отсутствия возможности развития ионизации в рабочих условиях при сохранении принятого сейчас значения рабочей напряженности.

Однако заметное повышение начального запаса против развития ионизации и улучшение устойчивости к воздействиям перенапряжений делают весьма маловероятной возможность появления ионизации в секциях конденсаторов с толщиной диэлектрика 50 мкм даже при  $E_p = 12,5$  кв/мм. Надо также иметь в виду, что и при существующей недостаточно рациональной конструкции пробой конденсаторов в условиях эксплуатации не носит массового характера, и срок службы их в среднем достаточно велик.

**Выводы.** 1. Напряжение начала ионизации в бумажно-масляном конденсаторе имеет два характерных значения: начальное, свойственное новому конденсатору, и минимальное, которое может быть достигнуто в эксплуатации в результате воздействия перенапряжений, превышающих начальное ионизирующее напряжение.

2. В конденсаторах современной конструкции начальная ионизирующая напряженность превышает рабочую напряженность примерно в 3 раза, а минимальная ионизирующая напряженность ниже рабочей на 40...45%.

3. Преждевременный выход из строя силовых конденсаторов в значительной мере объясняется

тем, что под действием перенапряжений ионизирующее напряжение падает до уровня рабочего напряжения.

4. Можно улучшить ионизационные характеристики бумажно-масляных конденсаторов путем снижения толщины диэлектрика в секциях с 80 до 50 мкм при сохранении достаточного запаса кратковременной электрической прочности.

#### Литература

1. М. М. Морозов. Советское конденсаторостроение и его ближайшие задачи. Электричество, № 11, 1949.

2. М. М. Морозов. Вестник электропромышленности, № 6, 1934.

3. В. Т. Ренне. Старение пропитанной бумажной изоляции при переменном и постоянном напряжениях. Электричество, № 4, 1952.

4. В. Т. Ренне и С. Ю. Лукьянов. Вестник электропромышленности, № 11—12, 1932.

5. В. М. Файниткий. Сциллографирование токов в изоляции. Электричество, № 4, 1952.

6. В. Т. Ренне, В. М. Файниткий и Д. С. Варшавский. Воскообразование в изоляции бумажно-масляных конденсаторов. Электричество, № 12, 1953.

7. В. Т. Ренне. Электрические конденсаторы. Госэнергоиздат, стр. 70, 1952.

[2. 2. 1954]



# Из опыта работы

## Применение выключателей нагрузки для автоматического включения резерва

Инж. В. А. КОЗЛОВ и инж. В. Д. ЕРЕМЕЕВ

Ленинградская кабельная сеть

Автоматическое включение резервного питания (АВР) имеет большое значение для обеспечения бесперебойности электроснабжения потребителей. Но на пути его внедрения встречается ряд трудностей, к которым относится, например, отсутствие достаточно простых автоматических выключателей и приводов к ним.

В последние 2 года в Ленинградской кабельной сети для устройств АВР довольно широко применяются выключатели нагрузки типа ВН-16, выпускаемые Ленинградским заводом «Электроаппарат». Результаты применения их оказались настолько благоприятными, что автоматизация сети 6 кв Ленинграда в настоящее время проводится в основном с использованием выключателей ВН-16.

Чтобы выключатель нагрузки ВН-16 мог быть использован в устройствах АВР, потребовалась некоторая его переделка, которая свелась к простой перестановке отключающих пружин на траверзе выключателя (рис. 1). После этой переделки выключатель ВН-16 может производить автоматическое включение. Время этого включения равно примерно 0,07 сек.

Сочетание двух выключателей нагрузки — обычного и переделанного — и позволило создать устройство АВР. При этом для выключателей используется обычный привод типа ПРА-12, поставляемый заводом комплектно с выключателем. Привод ПРА-12, как известно, имеет одну встроенную катушку напряжения для целей автоматического управления выключателями нагрузки. Остальное оборудование ничем не отличается от применяемого в существующих устройствах АВР. Однако использование выключателей нагрузки ВН-16 вносит в устройства АВР ряд специфических особенностей.

В зависимости от ответственности потребителя и схемы электроснабжения устройства АВР, в которых используются выключатели нагрузки ВН-16, бывают двух типов: с токовой блокировкой и без нее. Первые применяются для более ответственных потребителей, вторые — для менее ответственных.

Схема устройства АВР с токовой блокировкой для одной из схем питания потребителя приведена на рис. 2. При повреждении питающей линии 1 будет отключена от защиты выключателем, находящимся в ее начале, и напряжение на шинах подстанции исчезнет. Реле минимального напряжения замкнет цепь оперативного тока,

приводится опыт применения выключателей нагрузки типа ВН-16 для автоматизации включения резерва в сети среднего напряжения г. Ленинграда. Приводятся возможные варианты схем устройства АВР и рассматривается их действие.

в результате чего произойдет отключение выключателя нагрузки 6. Блок-шайбы последнего замкнут цепь включения вы-

ключателя нагрузки 7, и питание потребителя, таким образом, автоматически будет переведено на резервную линию 2. Контроль напряжения на шинах подстанции осуществляется с помощью трансформатора напряжения 4. Для питания оперативных цепей автоматики предусматривается трансформатор напряжения 5, присоединенный непосредственно к резервной линии.

Уставка времени устройства АВР складывается из времени действия релейной защиты в начале питающей линии и времени, необходимого для надежной работы устройства и равного примерно 0,5 сек. Для потребителей распределительных сетей 6 и 10 кв выдержка времени будет находиться в пределах 1,5 ... 2,0 сек, для потребителей питающих сетей — 2,5—3,0 сек. Ввиду того, что выключатели нагрузки работают надежно, имеется возможность снизить выдержку времени до минимальной величины 0,5 сек. Эта возможность будет определяться в основном условиями питающей сети. Кроме того, выдержка времени и напряжение трогания реле минимального напряжения должны быть согласованы с возможными аварийными посадками напряжения в сети.

В случае повреждения на шинах подстанции устройство АВР не должно работать, так как через выключатель 6 будет протекать ток короткого замыкания. В связи с этим в схеме АВР предусматривается токовая блокировка, осуществляемая с помощью трансформаторов тока и

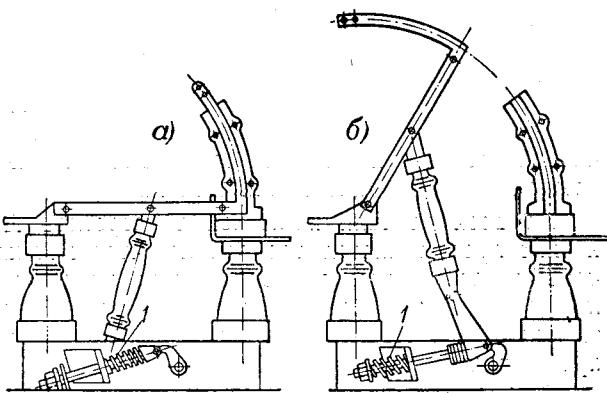


Рис. 1. Выключатель нагрузки ВН-16.  
а — до переделки; б — после переделки; 1 — отключающая пружина.

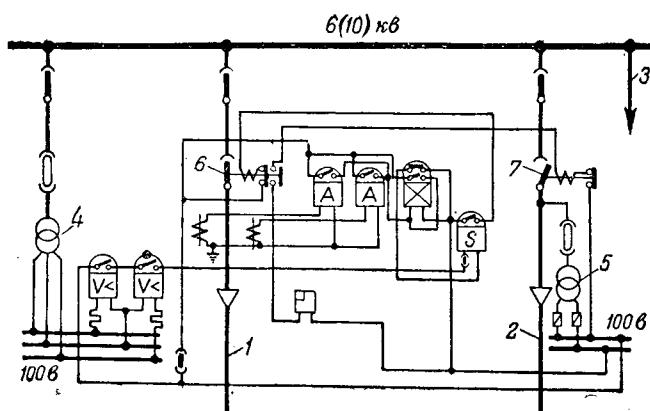


Рис. 2. Схема устройства АВР с токовой блокировкой.  
1 — питающая линия; 2 — резервная линия; 3 — нагрузка потребителя;  
4 — трансформатор напряжения для контроля напряжения на шинах;  
5 — трансформатор напряжения для питания оперативных цепей автомата;  
6 — выключатель нагрузки (обычный); 7 — выключатель нагрузки (переделенный);  
1008 — предохранитель.

двоих токовых реле типа ЭТ-520 (рис. 2). При коротком замыкании на шинах подстанции действием токовых реле разрывается цепь оперативного тока реле времени и устройство АВР выводится из работы. Ток срабатывания реле ЭТ-520 определяется параметрами сети.

Рассмотренная схема устройства АВР может применяться при условии, если напряжение на трансформаторе 5 при повреждении на шинах подстанции остается не ниже 35...50 в. В противном случае токовая блокировка может отказать. В том случае, когда резервное питание потребителя осуществляется от другого источника, это условие выполняется; во всех же остальных случаях в этом следует убедиться путем расчета остаточного напряжения на трансформаторе 5 при повреждении на шинах подстанции. Практика применения схемы рис. 2 в городской сети 6 кв Ленинграда показывает, что остаточное напряжение, как правило, не ниже 35...50 в.

В городских распределительных сетях среднего напряжения питающие линии, как правило, транзитные. Транзитная линия заводится на шины 6 (10) кв между трансформатором 4 и линией 1, а выключатель нагрузки 6 устанавливается на шинах подстанции между линиями 1 и 2. При повреждении в любом месте питающей транзитной линии выключатель 6 будет отключать секции шин. В случае, когда подстанция секционирована и нагрузка потребителя распределена по секциям, можно применить двустороннее устройство АВР, особенность которого состоит в том, что выключатели нагрузки и токовая блокировка устанавливаются на обеих питающих линиях.

Во всех случаях применения устройств АВР к ним предъявляется требование, чтобы выключатели нагрузки не производили отключения токов короткого замыкания и чтобы ток короткого замыкания в месте установки выключателей не превосходил их тока динамической устойчивости.

Схема устройства АВР без токовой блокировки для аналогичной схемы питания приведена на рис. 3. При повреждении питающей линии она

работает аналогично схеме устройства АВР с токовой блокировкой (рис. 2).

В случае повреждения на шинах подстанции питающая линия 1 отключается от защиты выключателем, находящимся в ее начале. Только после этого, т. е. с выдержкой времени, которая для распределительной сети равна примерно 1,5...2,0 сек, отключается выключатель нагрузки 6. Затем выключатель 7 включает резервную линию 2 на поврежденные шины подстанции, вследствие чего перегорает предохранитель 8. В результате подстанция полностью обесточивается.

Селективность защиты питающих линий и подстанции обеспечивается всегда, так как предохранители перегорают практически мгновенно.

Если приемники энергии потребителей имеют выключатели с релейной защитой, необходимо предусматривать шунтирующие разъединители 9, которые включаются на время питания потребителя по резервной линии. Если же для защиты приемников применены предохранители, то в этих разъединителях нет необходимости. Предохранители в этом случае должны быть расставлены таким образом, чтобы обеспечивалась селективность защиты.

Возможность автоматического включения выключателя нагрузки ВН-16 на короткое замыкание через предохранители ПК была проверена экспериментально в действующей сети 6 кв Ленинграда. При мощности трехфазного короткого замыкания в месте установки выключателя примерно 90 000 ква предохранители ПК-6 и выключатель ВН-16 работали безупречно. После неоднократных включений на короткое замыкание на контактах выключателя были обнаружены незначительные, легко устранимые обгорания. Результаты экспериментов и эксплуатации позволяют утверждать, что выключатели нагрузки ВН-16 могут с успехом включать линии на короткое замыкание, если мощность последнего не превышает мощности динамической устойчивости выключателя, т. е. 125 тыс. ква. Дополнительные испытания, проведенные в последнее время в ла-

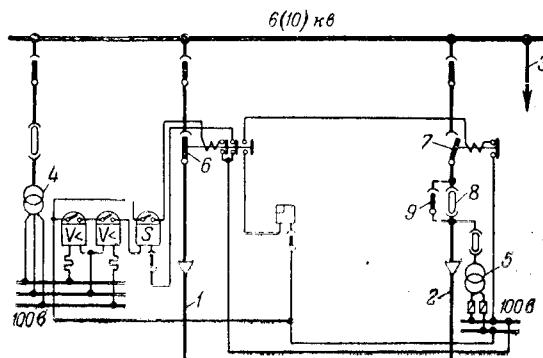


Рис. 3. Схема устройства АВР без токовой блокировки.  
1 — питающая линия; 2 — резервная линия; 3 — нагрузка потребителя;  
4 — трансформатор напряжения для контроля напряжения на шинах;  
5 — трансформатор напряжения для питания оперативных цепей автомата;  
6 — выключатель нагрузки (обычный); 7 — выключатель нагрузки (переделенный);  
8 — предохранитель; 9 — шунтирующий разъединитель.

боратории Ленинградского филиала ВЭИ, подтверждают последний вывод.

В распределительной сети среднего напряжения Ленинграда устройства АВР без токовой блокировки получили наибольшее распространение, причем они применяются не только при схемах, подобных представленной на рис. 3, но и при других схемах питания потребителей.

При соответствующих условиях можно отказаться от одного выключателя нагрузки. Тогда схема устройства АВР примет вид, показанный на рис. 4.

При схеме рис. 4 потребуется два комплекта предохранителей типа ПК. Предохранители этого же типа должны быть применены для защиты приемников потребителей. Для обеспечения селективности защиты номинальный ток предохранителя 8 принимается на одну-две ступени меньше тока предохранителя 7 и на одну-две ступени больше токов предохранителей, установленных для защиты приемников потребителей.

При повреждении питающей линии выключатель 6 под действием реле минимального напряжения включается на короткое замыкание, вследствие чего перегорает предохранитель 8, и питание потребителей переводится на резервную линию.

При повреждении на шинах подстанции включается выключатель 6 и в соответствующей последовательности перегорают предохранители. В результате подстанция полностью обесточивается.

В схему устройства АВР в каждом отдельном случае могут быть внесены те или иные упрощения. Например, если питающийся от подстанции потребитель имеет только один трансформатор, то предохранитель 8 может быть одновременно использован и для защиты этого трансформатора. Трансформатор напряжения типа НТМ (трансформатор 4) можно заменить трансформатором типа НОМ, ограничившись при этом уста-

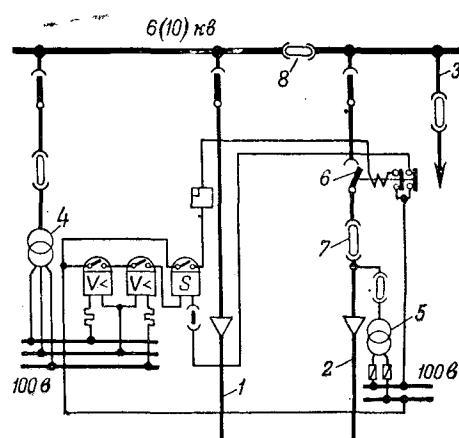


Рис. 4. Схема устройства АВР без токовой блокировки с одним выключателем нагрузки.

1 — питающая линия; 2 — резервная линия; 3 — нагрузка потребителя; 4 — трансформатор напряжения для контроля напряжения на шинах; 5 — трансформатор напряжения для питания оперативных цепей; 6 — выключатель нагрузки; 7 и 8 — предохранители.

новкой одного реле минимального напряжения. Кроме того, этот трансформатор можно присоединять к питающей линии 1 и размещать в одной с ней ячейке. Наконец, в некоторых случаях в зависимости от характера нагрузки можно вообще отказаться от трансформатора 4, а для контроля напряжения использовать силовые трансформаторы потребителя.

Упрощенные таким образом устройства АВР могут размещаться в типовых помещениях сетевых трансформаторных подстанций (ТП). В связи с этим открывается возможность полной автоматизации городских распределительных сетей среднего напряжения.

Рассмотренные устройства АВР могут найти и находят применение в сетях 6 и 10 кв промышленных предприятий.

[21. 9. 1953]



## Николай Гаврилович Славянов

*К столетию со дня рождения*

5 мая 1954 г. исполнилось 100 лет со дня рождения одного из крупнейших в минувшем столетии изобретателей Николая Гавриловича Славянова, с именем которого связаны создание металлургических основ и последующее развитие дуговой электросварки металлов, создание первого автомата для дуговой электросварки плавким металлическим электродом и сварочного генератора, а также способа «электрического уплотнения металлических отливок».

Н. Г. Славянов родился в с. Никольском, Задонского уезда, Воронежской губ. в семье обедневшего помещика, штабс-капитана в отставке Гаврила Николаевича Славянова. По окончании в 1872 г. с золотой медалью Воронежской гимназии он поступил в Петербургский горный институт [Л. 1].

Выдающиеся способности Николая Гаврилова, неутомимое трудолюбие и настойчивость в работе проявились уже в студенческие годы. Его студенческие работы отличались тщательной и глубокой разработкой и неоднократно получали похвальные отзывы.

В июне 1877 г. Н. Г. Славянов окончил Институт со званием горного инженера 1-го разряда, после чего был направлен на Воткинский горный завод, а затем в 1881—1883 гг. работал на Омутнинских заводах. В 1883 г. он получил назначение на Пермские казенные пушечные заводы, где последовательно состоял управителем орудийных и механических цехов, затем с 1888 г. помощником Горного начальника, а с 1891 г. до конца своей жизни (18 октября 1897 г.) Горным начальником (директором) заводов.

С самого начала своей практической деятельности на Пермских заводах Н. Г. Славянов заинтересовался новой в то время отраслью знаний — электротехнической. Как высокообразованный инженер с широким техническим кругозором он пришел к заключению, что наиболее эффективным способом поднятия технического уровня заводов является широкое применение на них электричества.



В дальнейшем, в 1892 г., будучи уже крупнейшим изобретателем в области прикладной электротехники, Н. Г. Славянов, отмечая успехи, достигнутые за 12 лет, прошедшие с начала практического применения электрической дуги для обработки металла, так оценил роль электротехники в последующем развитии промышленности: «...можно смело надеяться, что в недалеком будущем электричество захватит себе почетное место во всяком как металлургическом, так и механическом заводе» [Л. 2].

Н. Г. Славянов понимал, что в этот начальный период использования прикладной электротехники (80-е годы) трудно было рассчитывать на получение необходимого электрооборудования с других предприятий и что все требуемые заводу электрические машины и аппараты необходимо проектировать и строить собственными средствами. А для осуществления этой задачи необходимо было сначала самому более глубоко изучить электротехнику. Следует учесть, что в Горном институте курс электротехники былведен лишь в 1896 г. и Н. Г. Славянов много времени уделял самостоятельным занятиям по электротехнике [Л. 3].

Полученные Н. Г. Славяновым знания в области электротехники позволили ему самостоятельно конструировать различные необходимые для завода электрические машины и приборы. По чертежам и расчетам Н. Г. Славянова Пермскими заводами были изготовлены самостоятельно две крупные по тому времени динамомашины постоянного тока, из которых одна ( $300\text{ a}, 60\text{ в}$ ) с приводом от паровой машины мощностью  $60\text{ л. с.}$  уже с 1887 г. использовалась для освещения завода [Л. 4], а вторая ( $1\,000\text{ a}, 100\text{ в}$ ) с приводом от паровой машины мощностью  $150\text{ л. с.}$  — как для освещения завода, так и в последующем для питания постов дуговой сварки.

Цехи Пермских пушечных заводов одними из первых в России были освещены электрическими дуговыми лампами конструкции Н. Г. Славянова. В 1891 г. более 700 таких электрических ламп

освещали заводы, а к концу 90-х годов их было уже свыше 2 500 [Л. 5 и 6].

Построенная Н. Г. Славяновым электростанция послужила технической базой при разработке им методов электрической отливки металлов и электрического уплотнения металлических отливок. Через несколько лет Н. Г. Славянов построил вторую электрическую станцию.

Мировую известность Н. Г. Славянов приобрел благодаря выдающемуся изобретению — «электрической отливке металлов». Как известно, создателем дуговой электросварки металлов является талантливый русский изобретатель Н. Н. Бенардос, который 31 декабря 1886 г. получил привилегию на свое изобретение «способ соединения и разъединения металлов непосредственным действием электрического тока», названный им «электрографест». Этот новый технологический процесс обработки металлов вызвал большой интерес у Н. Г. Славянова. При анализе «электрографеста» Николай Гаврилович критически оценил отдельные стороны этого метода и задался целью найти более совершенное решение поставленной задачи.

Проведенные им опыты практического применения способа Н. Н. Бенардоса дали ему материал для раскрытия совершенно новых возможностей, таящихся в процессе использования тепла электрической дуги. Со всей страстью ученого изобретателя он настойчиво работал над разрешением новой проблемы. Последовательный ряд опытов Н. Г. Славянова завершается выдающимся изобретением «электрической отливки металлов», на которое 13 августа 1891 г. им была получена привилегия. В то же время Н. Г. Славяновым были получены патенты и за границей — во Франции, Германии, Англии, Австро-Венгрии, Бельгии; им были сделаны заявки в США, Швеции и Италии.

Сущность изобретения сформулирована в привилегии Н. Г. Славяновым так: «Электрическая отливка металлов заключается главным образом в наплавлении расплавляемого электрическим током металла на желаемую часть поверхности металлической вещи, причем эта часть также более или менее расплавляется и соединяется (сливается) с наливаемым металлом в высшей степени совершенно. Металл обрабатываемой вещи и отливаемый металл могут быть одинаковые и различные. Отливаемым металлом служит металлический стержень, который вместе с тем составляет один из электродов вольтовой дуги. Вольтова дуга поддерживается автоматически, с помощью специального регулятора».

Н. Г. Славянов разработал metallurgические и технологические основы процесса дуговой электросварки металлов.

Определение, данное Н. Г. Славяновым его изобретению «электрическая отливка металлов», является строго обоснованным и вытекает из сущности самого технологического процесса. Цех, в котором проводились работы по дуговой электросварке металлов, Н. Г. Славянов назвал «электролитейным», а рабочих он квалифицировал как «электролитейщиков».

Одним из основных отличий изобретения Н. Г. Славянова является разработанный им «ванный» метод, заключающийся в том, что под воздействием электрической дуги создавалась достаточно глубокая «ванна» из расплавленного основного и электродного металла. Н. Г. Славянов считал необходимым вести процесс электрической отливки под шлакообразующими покрытиями, изолирующими металл от воздействия воздуха и участвующими в металлургическом процессе. Целесообразность применения шлаковой защиты Н. Г. Славянов сформулировал в своей привилегии. Для раскисления металла ванны и регулирования ее химического состава Н. Г. Славянов применял присадки различных ферросплавов (ферромарганец, ферросилиций и др.).

Метод Н. Г. Славянова предоставлял возможность выполнения полного металлургического цикла выплавки стали. Характеризуя свой способ с этой точки зрения, Н. Г. Славянов отмечал, что «...обработка с помощью «электрической отливки металлов» вполне металлургическая, так как над жидкой металлической ванной очень удобно производить многие металлургические операции прибавлением каких угодно примесей или реагентов, которые размешиванием можно равномерно распределить во всей массе отлитого металла...» [Л. 2].

Одним из необходимых мероприятий для обеспечения качественного соединения металлов Н. Г. Славянов считал предварительный подогрев основного металла. Поэтому он выполнял почти все работы, пользуясь методом «горячей сварки», сохранившим свое значение и в настоящее время, особенно в связи с развитием применения легированных сталей.

Важнейшей особенностью технологии, предложенной Н. Г. Славяновым, является обязательность автоматического регулирования длины электрической дуги. Только при выполнении этого условия он считал возможным промышленное применение «плавкого» электрода: «...Если электрод плавкий, то невозможно поддерживать непрерывную вольтову дугу без автоматического регулирования...» [2].

Решение этой задачи — поддержания постоянства длины дуги — в условиях сложных процессов, протекающих в дуге при плавлении электрода и переносе металла, требует применения сложных и весьма чувствительных регулирующих устройств. И эта задача была успешно разрешена Н. Г. Славяновым созданием специального автоматического электрического регулятора длины дуги, названного им «плавильником», который является прообразом современных автоматических сварочных установок.

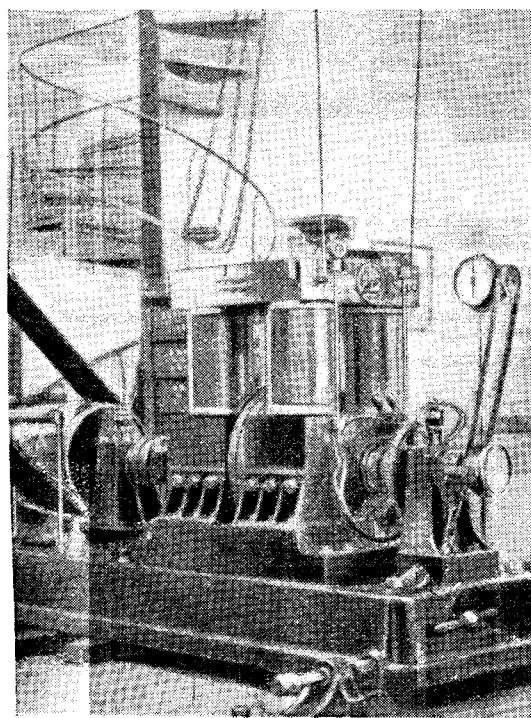
Внимание, которое Н. Г. Славянов уделял вопросу автоматического регулирования длины дуги, свидетельствует о технической прозорливости изобретателя, предвосхитившего за несколько десятков лет применение механизмов для регулирования длины электрической дуги, имеющих значение и в современной технике автоматической сварки. Вместе с тем следует отметить, что отри-

цательное мнение Н. Г. Славянова о возможности проведения процесса электрической сварки плавким электродом без применения автоматического регулирования длины дуги в дальнейшем не оправдалось — ручная дуговая электросварка получила, как известно, широкое применение.

Впервые Н. Г. Славянов успешно применил свое изобретение на Пермских заводах в ноябре 1888 г. при сварке вала паровой машины, и таким образом, эту дату следует считать началом практического применения данного способа в производстве.

В следующем 1889 г. Н. Г. Славянов впервые применил электросварку в судостроении при постройке на Пермских заводах крупнейшего по тому времени баксирного транспортного парохода «Редедя князь Косогский». Убедительным доказательством высокого качества работ, произведенных Н. Г. Славяновым при постройке этого парохода (ныне «Степан Разин»), является то, что он, выйдя в свой первый рейс 9 мая 1890 г. [Л. 7], до настоящего времени находится в эксплуатации и является одним из крупнейших нефтеузов в составе Волжского нефтеперевалочного пароходства.

От отдельных опытных электросварочных работ по своему способу в 1890—1891 гг. Н. Г. Славянов перешел затем к широкому его применению, создав на Пермских заводах специальный цех, названный им «Электролитейной фабрикой», работавший под его непосредственным руководством. За 1891—1894 гг. «Электролитейной фабрикой» были отремонтированы самые разнообразные по весу (до 7 т) и назначению детали машин, пароходов, паровозов и др., общим количеством 1 631 шт. и весом 280 т.



Сварочный генератор Н. Г. Славянова

О рентабельности применения этого технологического процесса можно судить по тому, что за указанный период «Электролитейная фабрика» дала заводу прибыль в сумме около 65 000 руб. [Л. 8]. Свой способ Н. Г. Славянов применял также и на основном производстве Пермских заводов, сваривая пушечные лафеты и пр.

В короткий срок электрическую отливку металлов освоил ряд заводов, железнодорожных и портовых мастерских (Невский механический завод, Обуховский, Лесснер, Сормовский, Ижевский, Одесские железнодорожные мастерские, Кронштадтские портовые мастерские и др.).

Одновременно широкое применение способ «электрической отливки металлов» получил на заводах Германии, Франции, Австрии, Англии и в других странах [Л. 9].

Вторым крупным изобретением Н. Г. Славянова было «электрическое уплотнение металлических отливок», на которое он также получил привилегию в России и патенты в ряде других стран. Это изобретение явилось результатом большой работы, выполненной Н. Г. Славяновым для улучшения качества стальных слитков, изготавливавшихся Пермскими заводами. Оно создавалось параллельно с «электрической отливкой металлов».

Глубокие знания в области металлургии и электротехники дали Н. Г. Славянову возможность в короткий срок добиться значительных результатов по улучшению качества слитков. В своих докладах на общих собраниях РТО в Петербурге в 1892 и 1895 гг. Н. Г. Славянов подробно осветил сущность применяемого им процесса электрического уплотнения слитков [Л. 2 и 10].

В привилегии отмечено, что «способ электрического уплотнения металлических отливок заключается в подогревании только что отлитых предметов посредством вольтовой дуги, не позволяющей металлу застывать, с целью получения отливки без пузьрей (раковин), без усадки и без так называемой «прибыли» в верхней части, обыкновенно идущей в отброс...»

Для работ по электрическому уплотнению отливок использовались имевшиеся на заводе динамомашины постоянного тока.

В привилегии отмечено, что «...источником электричества для этой работы может служить батарея аккумуляторов или динамо-электрическая машина с несгораемым якорем, причем эти источники должны давать не менее 200—300 а при разности потенциалов не менее 50 в». Процесс уплотнения слитка весом 8,5 т производился при силе тока в среднем 600 а и напряжении 90 в [Л. 11].

Начав опыты по этому своему изобретению с малых слитков, Н. Г. Славянов постепенно переходил к более крупным и в 1894—1895 гг. обработал слитки весом от 5 до 12 т. Длительность процесса уплотнения слитков весом 5—5,5 т составила около 3,5 часа, а весом 12 т — 5,5 часа.

Опыты Н. Г. Славянова по применению способа «электрического уплотнения металлических отливок» неопровергимо показали его техническую целесообразность и экономическую выгодность. Идеи Н. Г. Славянова, положенные в основу данного изобретения, заслуживают глубокого внимания и изучения и в наше время. На их основе при современных возможностях электротехники может быть создан весьма эффективный способ повышения качества слитков и снижения потерь металла.

Для популяризации своих трудов по электротехнике Н. Г. Славянов экспонировал свои изобретения и зачастую принимал личное участие в работе выставок: в 1887 г. — в Екатеринбурге (Свердловск), в 1892 г. — Петербурге.

Петербургская выставка явилась триумфом русских изобретателей дуговой электросварки металлов Н. Н. Бенардоса и Н. Г. Славянова. Оба они были награждены высшей наградой — золотыми медалями Русского технического общества.

В этом же году большое количество деталей, сваренных по способу Н. Г. Славянова, были экспонированы на «Московской электрической выставке».

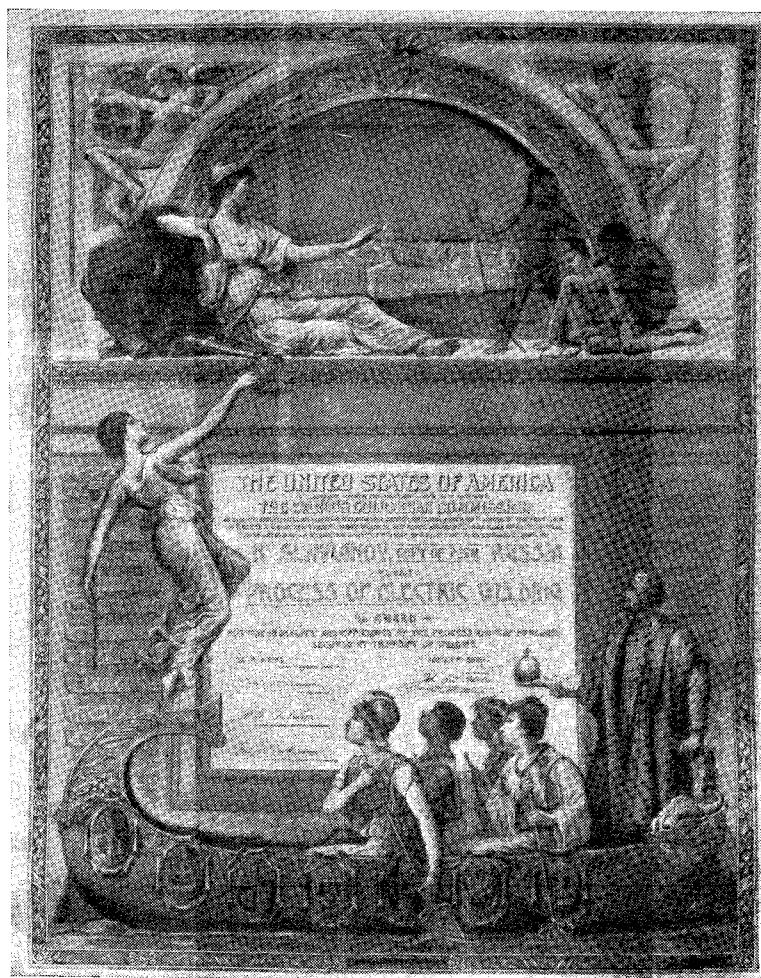
На крупнейшей в XIX в. Всемирной электротехнической выставке в Чикаго в 1893 г. Н. Г. Славянов был награжден «За дуговую электрическую сварку» золотой медалью.

Изобретения Н. Г. Славянова экспонировались также в 1896 г. на Всероссийской промышленной и художественной выставке в Нижнем Новгороде (г. Горький).

В 1900 г., уже после смерти Н. Г. Славянова, его изобретения с успехом экспонировались на Всемирной выставке в Париже.

Несмотря на большую загрузку как начальника заводов и непосредственного руководителя созданной им «электролитической фабрики», Н. Г. Славянов написал и издал ряд книг. Литературные работы Н. Г. Славянова отличаются ясным изложением, содержат весьма ценный материал, сохранивший значительный практический интерес и в настоящее время. Книга «Электрическая отливка металлов» (1891 г., СПБ) была выпущена на немецком, французском и английском языках. Другая книга «Электрическая отливка металлов» (Руководство к установке и практическому применению), изданная в Петербурге в 1892 г., явилась первым в мире научным руководством по дуговой электросварке и подробной инструкцией электросварщику.

Безвременная смерть Николая Гавриловича прервала его работы по осуществлению новых изобретательских идей. Несмотря на все очевидные преимущества выдающихся изобретений Н. Г. Славянова, в условиях дореволюционной России они не получили должного развития и применения и вскоре после смерти его были почти забыты.



Диплом Всемирной электротехнической выставки в Чикаго, 1893 г., выданный Н. Г. Славянову.

Только после Великой Октябрьской социалистической революции дуговая электросварка наряду с другими передовыми способами обработки металлов получила в Советском Союзе исключительно широкое распространение во всех отраслях народного хозяйства.

Разработанные Н. Г. Славяновым методы дуговой электросварки дали возможность советским ученым и инженерам на основе дальнейшего развития этих методов создать современные высокопроизводительные способы промышленной автоматической дуговой сварки.

Особенно ярко сказалось полное торжество идей Н. Г. Славянова в области дуговой электросварки металлов в созданном советскими учеными и инженерами способе автоматической сварки под слоем флюса. Основы этого способа сварки — механизированная подача голого металлического электрода и защита сварочной зоны слоем порошкообразного вещества (флюса) — были выдвинуты Н. Г. Славяновым свыше 60 лет назад. В процессе дальнейшего развития электросварки под флюсом в СССР были созданы первые в мире конструкции самоходных сварочных головок и сварочных тракторов, позволивших во многих случаях обходиться без сложных и дорогостоящих автосварочных установок.

Разработка нового способа автоматической и полуавтоматической шланговой сварки с применением электродной проволоки малых диаметров значительно расширила область возможного применения сварки под слоем флюса, так как она представила возможность производить сварку не только прямолинейных и кольцевых швов, но и швов коротких и криволинейных, а также недоступных для сварки обычными автоматами.

Крупным достижением последних лет в области развития электрической сварки под флюсом является создание способа вертикальной сварки с принудительным формированием шва, который уже успешно применяется в заводских условиях — в котлостроении, судостроении и др., а также на монтаже.

Основным направлением в развитии советской сварочной техники является применение автоматической и полуавтоматической сварки, которая в некоторых отраслях промышленности почти полностью вытеснила ручную сварку [Л. 12].

На основе предложенного Н. Г. Славяновым «ванного» способа сварки советскими учеными разработан способ сварки стержней арматуры для железобетона, который успешно применяется на ряде строительств крупнейших гидротехнических сооружений. На площадке Куйбышевгидростроя «ванный» способ получил широкое распространение и применяется к сварке таких крупных объектов, как каркасы фундаментных плит зданий гидроэлектростанций.

Советский народ чтит память выдающегося русского изобретателя.

Совет Министров СССР в декабре 1949 г. издал постановление об увековечении памяти Н. Г. Славянова, впервые разработавшего и широко применившего метод электросварки металлов металлическим электродом. Постановлением предусмотрено соорудить в г. Молотове памятник — бюст Н. Г. Славянова и установлены стипендии для аспирантов и студентов вузов. Архив Н. Г. Славянова был передан Академии наук СССР.

Решением Молотовского городского совета депутатов тружеников останки Н. Г. Славянова 28 ноября 1948 г. были перенесены на новое место — площадь сквера Дома техники завода в рабочем поселке Молотовского района. Здесь в мае 1954 г. состоялся митинг, посвященный открытию памятника Н. Г. Славянову (скульптурный портрет помещен на стр. 83). Под бронзовым бюстом ученого на постаменте, сделанном из черного мрамора, золотом выведены слова: «Николай Гаврилович Славянов. 1854—1897 гг.».

По ходатайству рабочих Молотовского района г. Молотова один из пассажирских пароходов Камского речного пароходства был в 1951 г. переименован в «Н. Г. Славянов».

В электротехническом музее Ленинградского политехнического института им. Калинина, в Московском высшем техническом училище им. Баумана, в Доме техники завода в г. Молотове, в Политехническом музее в Москве экспонированы материалы — машины, приборы, образцы работ, фотографии и пр., относящиеся к изобретениям Н. Г. Славянова.

7—8 мая 1954 г. в г. Молотове состоялась Юбилейная научно-техническая сессия Уральского филиала Академии наук СССР, посвященная 100-летию со дня рождения Н. Г. Славянова. На сессии были заслушаны доклады о творчестве Н. Г. Славянова и о новейших достижениях в области дуговой электросварки металлов.

#### Литература

1. Государственный исторический архив Ленинградской области (ГИАЛО), фонд № 693, Горный институт, с. № 446, д. № 8995 о студенте Николае Славянове л. д. 1. Прошение Н. Г. Славянова Директору петербургского горного института о допуске к приемным испытаниям.
2. Н. Г. Славянов. Доклад в 1 отд. РТО. «Электрическая отливка металлов». Записки РТО, июнь, 1892.
3. М. А. Шателен. Первый Всероссийский электротехнический съезд. Электричество, № 1, 1950.
4. М. А. Шателен, Н. Г. Славянов (некролог). Электричество, № 20, 1897.
5. П. К. Худяков. Заметки об Уральских заводах. Казенный Пермский завод. Технический сборник и вестник промышленности, стр. 434, № 10, 1891.
6. Д. И. Менделеев. Уральская железная промышленность в 1899 г., СПБ, ст. 2-я, стр. 14, 1900.
7. Государственный исторический архив Молотовской области (ГИАМоЛО), фонд № 276, Пермские пушечные заводы, опись № 1, д. № 35, л. д. 59.
8. А. А. Троицкий. О современном положении дела электрической обработки металлов по способу Бенардоса и Славянова. Записки русского технического общества, вып. 6, 1895.
9. А. С. Огневецкий и Л. Д. Радунский. Николай Гаврилович Славянов. Госэнергоиздат, 1952.
10. Н. Г. Славянов. Об уплотнении металлических отливок, установленном практически в применении к стальным болванкам. Доклад на общем собрании РТО 15 апреля 1895 г. Записки РТО, вып. 6, 1895.
11. С. Р. Туржанский. Электрическое уплотнение металлических отливок. Доклад на технической беседе 16 октября 1895 г. Электротехнический вестник, № 23, 1895.
12. В. П. Никитин. Ведущая роль отечественной науки и техники в развитии электрической сварки металлов. Изд. „Знание“, Москва, 1953.

**Инж. Л. Д. РАДУНСКИЙ**  
Московский энергетический институт  
им. Молотова



## Воспоминания об отце

Научная и техническая деятельность Николая Гавриловича Славянова хорошо освещена в литературе, имеются и краткие сведения о его жизни и личных качествах. Ценные материалы приведены в статьях М. А. Шателена, В. Н. Никитина, в книге А. С. Огиецевского и Л. Д. Радунского. Эти сведения были собраны в архивах Академии наук, МВТУ им. Баумана и ЛЭТИ им. Ульянова. Использован был и небольшой архив, имеющийся у меня. Таким образом, вряд ли можно добавить много новых фактов. Но может быть все-таки представлять некоторую ценность личные воспоминания сына и сведения, заимствованные им из рассказов родных. Мною сделаны некоторые дополнения к биографическим сведениям, взятые со слов либо Николая Гавриловича, либо его матери. Сведения о предках Н. Г. Славянова позволяют думать, что жизнь предков была сходная — офицерская служба в молодые годы и ведение хозяйства в поместье в остальное время жизни.

Отец Николая Гавриловича — Гаврила Николаевич был тоже офицером; в 1857 г. он вышел в отставку в чине штабс-капитана и поселился в своем поместье в с. Никольском в 20 км от уездного города Задонска Воронежской губ. В 1853 г. он женился на Софье Алексеевне Шаховской, дочери курского помещика А. Е. Шаховского. Во время Крымской войны Г. Н. Славянов вступил в государственное ополчение и в 1856 г. после окончания войны вышел в отставку. Он получил медаль «не в награду, а в воспоминание о Крымской войне» с правом ношения ее старшим в роде; медаль не сохранилась, а свидетельство находится у меня как старшего в роде.

Имущественное положение семьи Гаврилы Николаевича постепенно ухудшалось. Имение было продано за бесценок, притом в рассрочку. Между тем семья была большая (восемь сыновей и три дочери). Было трудно дать детям образование — только три сына получили высшее образование: Николай Гаврилович — в Горном институте, Александр Гаврилович — на математическом факультете Петербургского университета, Юрий Гаврилович — на юридическом. Повидимому, все дети были незаурядные, но их жизнь сложилась различно.

Александр Гаврилович был очень способным математиком, издал трехтомный атлас «Альбом чертежей рельсов и скреплений к ним, употребляемых на русских железных дорогах», имевший

6\*



широкое применение среди железнодорожников. А. Г. Славянов служил в Министерстве путей сообщения. Интересна его судьба. Он увлекался картежной игрой, определил математически наиболее вероятный порядок выпадения цифр в рулетке и, действительно, выиграл в Монте-Карло несколько миллионов франков. Во время революции он сдал эти деньги в банк и последние годы жил очень скромно, давая уроки математики.

Николай Гаврилович окончил Воронежскую гимназию в 1872 г. с золотой медалью. Никаких воспоминаний о гимназических годах не сохранилось, осталось лишь несколько разрозненных школьных табелей и фотография, воспроизведенная в книге А. С. Огиецевского и Л. Д. Радунского.

Петербургский горный институт отец окончил в 1877 г. по первому разряду. В студенческие годы он не получал никаких средств от семьи и жил на стипендию и уроки. Часы, остававшиеся от институтских занятий и уроков, Николай Гаврилович посвящал музыке и, несмотря на скучные средства, брал на прокат пианино.

В 1877 г. Николай Гаврилович временно проживая в Гатчине, женился на Варваре Васильевне Ольдерогге, дочери участника Отечественной войны 1812 г. В. В. Ольдерогге, начавшего военную службу солдатом в действующей армии и вышедшего в отставку полковником.

Техническая деятельность Н. Г. Славянова началась на Воткинском заводе в качестве смотрителя механического и токарного цеха и механика завода. В то время этот завод был одним из передовых железоделательных, сталелитейных, механических и судостроительных заводов и для молодого энергичного инженера был хорошей школой.

После 4 лет работы на Воткинском заводе Николай Гаврилович перешел на службу на Омутнинские заводы, где директором в то время был большой друг Николая Гавриловича Павел Михайлович Карпинский — двоюродный брат известного геолога Александра Павловича Карпинского. В 1883 г. Николай Гаврилович перешел на должность управляющего орудийных и механических цехов Пермских пушечных заводов. Трудный переезд зимой в сильный мороз в «возке», т. е. карете на полозьях, остался в моей памяти. Мне было тогда 5 лет.

Вся последующая работа отца протекала на этом заводе. Период работы на Пермском и Воткинском заводах подробно описан в книге

А. С. Огиевецкого и Л. Д. Радунского; нужно внести небольшую поправку. Под помещенной в книге на стр. 32 фотографией написано: «Здание первой электрической станции, построенной Н. Г. Славяновым». Это неверно: изображено на фотографии только помещение для аккумуляторов, а здание самой электростанции не показано, хотя снимок такой имеется.

Имеют интерес некоторые сведения о Николае Гавриловиче как ...«колокольном мастере». Письма с таким адресом он получал из разных мест России; в письмах содержались просьбы починить церковные колокола, что Н. Г. Славянов успешно выполнял. Я видел очень интересное письмо: перед пасхальными праздниками отец починил при помощи электросварки один колокол, а после пасхи получил колокол обратно с благодарностью и извинениями по поводу новой поломки колокола; оказывается пасху праздновали очень шумно и, радуясь, что колокол цел, так сильно били в него, что он опять сломался, но уже в новом месте. Колокол был снова починен.

Никаких намерений починить Царь-колокол в Московском Кремле у Николая Гавриловича не было. Эта мысль зародилась, повидимому, у доктора М. П. Глубоковского — редактора журнала «Ребус», который и напечатал в 1894 г. в «Русском обозрении» статью о желательности реставрации Царь-колокола. Отец говорил, что технически эту работу выполнить можно, но сам он не рекламировал ее.

Интересна неожиданная для Н. Г. Славянова связь его работы с лечебным делом. Можно было наблюдать, как около якоря динамо-машин находились женщины, приходившие «лечиться» — извлекать иголки, случайно попавшие в тело.

Можно отметить также попытки медицинского применения образующихся при электросварке излучений. Уже в наше время к доктору Ивану Павловичу Федорову, заведующему железнодорожной больницей в г. Молотове, пришел рабочий, болевший за несколько лет до того волчанкой. На этот раз он пришел с какой-то другой болезнью. Из разговора выяснилось, что этот больной работает в электросварочном цехе. Он давно заметил хорошее действие электросварочных лучей на волчанку, в связи с чем заменил предохранительное красное стекло защитными очками, предохранявшими только глаза и оставлявшими открытой остальную часть лица, и таким способом совершенно излечился от волчанки. И вот И. П. Федоров решил начать опыты применения освещения лучами электросварки больных различными болезнями (экземами, нарывами, волчанкой, спонтанной гангреной) можно успешно бороться таким путем. Опытами И. П. Федорова заинтересовались в Москве, и сейчас он продолжает свои исследования в специально для него оборудованной клинике.

День Николая Гавриловича был заполнен научно-технической и административной работой на заводе и научной работой за письменным столом дома. Научная работа сменялась отдыхом

за роялем или фисгармонией. Любимой музыкой отца была классическая, особенно произведения Бетховена и оперы, главным образом русские. Отец очень любил Лунную сонату Бетховена. Игра на рояле иногда длилась часами, но это было очень редко — все время поглощала научная работа. Семейная жизнь не отвлекала Николая Гавриловича от научной работы — жизнь нашей семьи протекала размеренно и спокойно. Николай Гаврилович был спокойным, ласковым отцом; вся семейная жизнь мягко и как-то незаметно регулировалась матерью, Варварой Васильевной, и отчасти бабушкой, Софьей Алексеевной, когда она приезжала из Воронежа.

Под конец жизни Н. Г. Славянова, примерно в последние 5 лет, научная работа полностью поглощала его внимание. Здоровье его было очень плохое — у него был сильный ревматизм и развивавшаяся под влиянием ревматизма сердечная астма. Умер отец внезапно, во время умывания, от «разрыва сердца» (вероятно, как это можно было бы установить теперь, от инфаркта). Ревматизм у отца прогрессировал из-за продолжительных работ по электросварке, происходивших в холодном заводском здании или даже под открытым небом не только летом, но и зимой.

В годы, когда отец был здоров, отых заключался летом в купанье, иногда в поездках в лес на лошадях или на катере, а зимой, во время рождественских праздников, он проходил на детских вечерах, елках, костюмированных балах. Я помню, какой большой эффект произвел Николай Гаврилович в костюме старой девы с собачкой. Иногда поездки в масках к знакомым происходили в большом угольном коробе (разумеется новом, чистом) на тройке лошадей. Бывали изредка развлечения и за карточным столом (преверанс и винт). Одно время знакомые отца увлекались и спиритизмом за круглым столом. Повидимому, отец тоже участвовал в этом развлечении. Тогда вызывались из «загробного мира» души знаменитых физиков и электротехников; впрочем, вспоминаю, что ничего умного или интересного они не сообщали. В конце концов в прощелках с «духами» была поймана одна из знакомых; все произошло так, как описано у Льва Толстого в «Глодах просвещения». После обнаружения жульничества сеансы прекратились.

Дети развлекались по-своему, много читали, летом увлекались плаваньем (плавали даже на остров на р. Каме) и катанием на лодке. Нашим любимым занятием было: прицепить лодку к корме парохода, чтобы уплыть за несколько верст вверх по Каме, и назад плыть медленно по течению, без весел. Помню, что такие, конечно не безопасные, развлечения проходили без особых выговоров или возражений со стороны родителей.

Еще несколько слов о знакомых и друзьях Николая Гавриловича Славянова. Самым близким другом его всю жизнь был прекрасный энергичный инженер Павел Михайлович Карпинский — начальник Кыштымского горного округа. В хороших отношениях он был также с инспектором Горнозаводского отдела Пермского реального

училища С. Н. Стемпневским и с инженером П. П. Савиным. Но вообще жизнь Н. Г. Славянова была замкнутой в работе и семье. Я даже не помню, бывали ли родители когда-нибудь в театре. В Перми была хорошая опера, и дети часто ее посещали.

Среди друзей Николая Гавриловича по справедливости надо указать рабочих и мастеров электросварщиков Захара Филипповича Гребеньщикова, Луку Ивановича Борчанинова, Петра Андреевича Аспидова, братьев Шиловых и др. Со стороны рабочих к Николаю Гавриловичу были прямо нежные чувства, они называли его Гаврильчиком, оставшиеся в живых до сих пор вспоми-

нают о нем с теплотой. Они отмечают значение организованного Н. Г. Славяновым кружка по изучению электротехники, организации прогимназии и детского приюта. Я помню, что в этих последних начинаниях принимала живое участие моя мать В. В. Славянова. На могилу отца под памятник рабочие положили чугунную доску с надписью: «Дорогому нашему начальнику и другу рабочих Николаю Гавриловичу Славянову, изобретателю электросварки от благодарного русского народа».

**Н. Н. СЛАВЯНОВ**  
Член-корр. Академии наук СССР  
Москва



## Дискуссии

### Книга „Общая электротехника“ под ред. С. А. Пресса

(Электричество, № 8, 1952; № 2, 3, 4 и 11, 1953; № 3, 1954)

ОТ РЕДАКЦИИ

Обсуждение в журнале книги «Общая электротехника» под ред. С. А. Пресса показало, что она не в полной мере удовлетворяет требованиям, предъявляемым к учебной электротехнической литературе для неэлектротехнических специальностей.

В книге недостаточно освещены вопросы истории развития электротехники и отдельных ее отраслей. Нельзя считать полными сведения по современным устройствам электроавтоматики, по выбору основных элементов электрических установок и пр. В то же время в книге имеются разделы, которые без заметного ущерба для учебного процесса могли бы быть опущены или сокращены (например, химические процессы в аккумуляторах, телевидение и др.). Особенно это относится к разделам, в которых без достаточных оснований повторяются определения и элементарные сведения, известные учащимся по курсу физики (не только высшей, но и средней школы).

Некоторые отмеченные в дискуссии недостатки книги должны быть отнесены за счет программы курса общей электротехники, которому в известной мере авторы программы придавали энциклопедический характер. Обсуждение, однако, показало, что группы отраслевых вузов — машиностроительных, транспортных, технологических и др.— нуждаются в таком учебнике общей электротехники, который давал бы учащимся необходимый минимум теоретических и практических знаний, необходимых в первую очередь для уяснения учащимся многообразных особенностей применения электротехники, изучаемых в специальных курсах.

В связи с этим напрашивается вывод о том, что программа курса общей электротехники, утвержденная для неэлектротехнических высших учебных заведений, подлежит коренному пересмотру. Для отдельных групп отраслевых вузов должны быть разработаны новые программы по общей электротехнике, учитывающие количество отводимых на эту дисциплину часов и специфику соответствующих отраслей промышленности. Это должно быть учтено при разработке Министерством высшего образования СССР новых программ.

### Книги по электроснабжению промышленных предприятий

(Электричество, № 110, 1952; № 2, 3, 7, 10, 11, 1953)

**Кандидат техн. наук,  
доц. А. А. ФЕДОРОВ,  
кандидат техн. наук,  
доц. Б. А. КНЯЗЕВСКИЙ**

Организованная редакцией журнала «Электричество» дискуссия по книгам «Электроснабжение промышленных предприятий» принесла читателям и авторам очень большую пользу.

С некоторыми высказываниями в дискуссии согласиться нельзя. В первую очередь мы имеем в виду выступление С. П. Розанова (№ 10, 1952 г.), в котором он предложил создавать отраслевые курсы электроснабжения. Несостоятельность этого предложения достаточно была доказана

участниками дискуссии. Создание отраслевых курсов электроснабжения привело бы к повторению на 90—95% основного и общего материала.

Рекомендуемая К. В. Булгаковым (№ 7, 1953 г.) замена курса «Электроснабжение промышленных предприятий» курсом «Энергоснабжение промышленных предприятий» нецелесообразна потому, что нет специальности такого профиля. Учебный план специальности «Электрификация промышленных предприятий» не предусматривает дисциплин тепломеханического характера. Специалисты тепломеханического профиля нужны на предприятиях не менее специалистов электротехнического профиля, но их готовят на факультетах промышленной теплотехники с соответствующей обширной и основательной тепломеханической базой.

Выступление Д. С. Лившица (№ 10, 1953 г.) с нашей точки зрения, не принесло пользы ни авторам книги, ни читателям. От работника Тяжпромэлектропроекта ожидались ценные советы, взамен которых он ограничился общими фразами о неудачности материала, об отдельных ошибках книги. Этим же характерно выступление и Л. Б. Гейлера, № 10, 1952 г. и № 11, 1953 г. По существу замечаний этих участников дискуссии можно ответить лишь одно: книга «Электроснабжение промышленных предприятий» — это книга не только об определении электрических нагрузок и о цеховых шинопроводах, а и о всем сложном комплексе производства, передачи и распределения электроэнергии на всех напряжениях от источников тока до токоприемников. Этот курс по своему характеру отличается станционно-сетевым профилем. Это обстоятельство еще более подчеркивается в новой программе курса, утвержденной в июне 1953 г. Министерством культуры СССР в связи с объединением курса «Монтаж и эксплуатация электрооборудования промышленных предприятий» с курсом «Электроснабжение промышленных предприятий».

С подавляющим числом других выступлений в дискуссии следует согласиться; при подготовке второго издания книги они будут учтены. Авторы приносят свою глубокую благодарность всем участникам дискуссии.

### Инж. Ю. Л. МУКОСЕЕВ

Дискуссия показала, что глубокое научное решение вопросов электроснабжения промышленных предприятий является острой и насущной задачей.

Обсуждавшиеся книги являлись первыми попытками обобщения специфических вопросов этой области, многие из которых являются еще спорными, как, например, определение расчетных нагрузок, применение экономической плотности тока в цеховых сетях и др. Следует отметить, что вопросам электроснабжения промышленных предприятий уделялось до сих пор мало внимания со стороны научных организаций, в частности Энергетического института им. Кржижановского АН СССР. Огромные материальные средства, закладываемые в системы электроснабжения промышленных предприятий, требуют усиления внимания научных работников к этим вопросам.

Основным недостатком своей книги автор считает ее конспективный характер, что было сопряжено с указанным автору ограниченным объемом. При чтении курса «Электроснабжение промышленных предприятий» в Горьковском политехническом институте автор пользовался своей книгой как методическим конспектом, дополняя его материалами из литературы по электросетям, подстанциям и пр.

### ОТ РЕДАКЦИИ

*Интерес к рассматривавшемуся в дискуссии вопросу вызван давно назревшей необходимостью создания квалифицированного учебного пособия по курсу «Электроснабжение промышленных предприятий», обобщающего научные и инженерные труды в этой области. Учебное пособие должно соответствовать существующим учебным планам и удовлетворять в первую очередь требованиям подготовки высококвалифицированных специалистов в области электроснабжения.*

*К работе по составлению пособия должен быть привлечен ряд авторов. Выпуск нескольких книг разных авторов будет иметь положительное влияние на разработку пособия высокого качества, которое должно быть создано применительно не к какой-либо одной отрасли промышленности, а в качестве единого руководства на базе научных обобщений с использованием опыта электроснабжения ряда отраслей народного хозяйства. При этом оно должно отражать специфические вопросы электроснабжения промышленных предприятий и не повторять вопросов, обычно излагаемых в смежных дисциплинах.*

## К статье Л. Д. Двоскина „Новая схема и конструкция распределительного устройства электростанций“

(Электричество, № 11, 1953)

**Проф. П. Г. ГРУДИНСКИЙ**

Московский энергетический институт  
им. Молотова

Л. И. Двоскин, справедливо указывает на ряд недостатков существующей типовой схемы электрических соединений для станций, выдающих свою мощность на генераторном напряжении, и на большие затраты, связанные с сооружением распределительных устройств напряжением 6 и 10 кв принятого типа. Мы считаем, что эти недостатки еще серьезнее, чем это указано в статье. Особенно это относится к надежности работы распределительных устройств.

Сопоставление данных, полученных кафедрой электрических станций МЭИ при обработке сведений, имеющихся в Техническом управлении МЭС, и данных обследования, проведенного ОРГРЭС, показывает, что за последние годы (1950—1952) на каждые 100 работающих устройств приходится четыре случая отключения сборных шин 6 и 10 кв в год. Для более ответственных устройств, имеющих дифференциальную или дистанционную защиту сборных шин, удельная повреждаемость еще выше: из каждых 100 устройств, снабженных такой защитой, последняя правильно отключала сборные шины в 5,5 устройствах в год. Для распределительных устройств электростанций число отключений сборных шин за период 1950—1952 гг. составляет девять случаев в год на 100 станций.

Таким образом, чем сложнее и ответственнее устройство, тем чаще в нем случаи полного отключения сборных шин. Нельзя не признать удельную повреждаемость рас-

пределительных устройств 6 и 10 кв исключительно высокой, требующей для своего снижения срочных мер.

Анализ причин повреждений, вызвавших полное отключение сборных шин, показывает, что свыше 70% их произошло из-за прямых ошибок персонала, главным образом из-за ошибок при операциях с шинными разъединителями и из-за включения на забытые переносные заземления безопасности. Необходимо отметить, что именно принятая у нас типовая схема требует наибольшего числа переключений шинными разъединителями и что именно в типовой схеме最难 осуществить блокировки от ошибочных переключений и неправильных наложений заземлений и включений на них.

Почти 15 лет существует требование «Правил технической эксплуатации», обязывающее в каждом устройстве иметь блокировку от ошибочных операций, но, несмотря на это, удельный вес аварий от ошибочных операций очень велик. Происходит это потому, что из всех известных схем только в типовой схеме необходима блокировка не только между разъединителями и соответствующими им выключателями, но и шинносоединительным выключателем, часто находящимся на значительном расстоянии. Что же касается блокировок от ошибок с заземлениями безопасности, то в типовой схеме дело обстоит еще сложнее, в то время как при иных схемах достаточно механической блокировки между заземляющими и рабочими ножами разъединителей.

Сказанное может служить доказательством того, что переход к новой схеме, не имеющей недостатков, присущих типовой схеме, является весьма актуальным и вызывается в первую очередь необходимостью повысить надежность работы распределительных устройств. Конечно, при

поисках новой типовой схемы не следует упускать из виду и другой задачи — обеспечения сооружения устройства индустриальными методами при широком использовании комплектных распределительных устройств. Решению обеих этих задач посвящена статья Л. И. Двоскина. Автор правильно ориентируется на применение схемы с одной системой сборных шин, при которой вероятность ошибочных операций значительно снижается, а устройство блокировок от них существенно облегчается. Тем не менее выдвигаемое им предложение в его настоящем виде не может быть принято по ряду причин, о которых скажем ниже.

Сначала отметим, что автор преувеличивает недостаток схемы с одной системой сборных шин. Серьезным недостатком ее он считает то, что в случае аварии на секции сборных шин генераторная мощность теряется на все время, пока не будет приведена в порядок поврежденная система сборных шин.

Можно считать установленным, что в течение года из 100 генераторов не менее десяти отключается из-за неполадок в них самих и около 20 из-за повреждений и неполадок в турбинах, а всего не менее 30 отключений.

Отключение сборных шин на станциях за последнее время было девять в год на 100 станций и из них 70% из-за ошибочных действий персонала. Обследование повреждений на сборных шинах за последние годы показало, что ни одно из них для своего устранения не потребовало больше 3 час. При одной системе сборных шин число этих повреждений должно существенно снизиться из-за большей наглядности схемы, облегчения блокировок и снижения числа оперативных переключений. Можно считать, что оно не будет больше трех в год на 100 устройств.

Сопоставляя 30 отключений генераторов в год из-за повреждений в них самих или в турбинах с тремя повреждениями шин в год на 100 устройств, нетрудно прийти к заключению о нецелесообразности усложнения схемы и повышения возможности повреждений в ней ради обеспечения резерва на случай очень редких аварий, в то время как независимо от этого система в целом должна иметь резерв на случай значительно более частых отключений генераторной мощности по другим причинам.

Приписывая схеме с одной системой сборных шин серьезный недостаток, который в действительности не является серьезным, автор не замечает важного обстоятельства, препятствующего применению как схемы с одной системой сборных шин, так и схемы автора, ее вариантов «без перемычек для линий» и с «50% перемычек для линий». Это обстоятельство связано с особенностями построения наших городских распределительных сетей. Почти все тяжелые сети строятся так, что резервирующие друг друга линии включаются и должны включаться на одну и ту же секцию сборных шин.

Даже при новых схемах построения сетей взаимно резервирующие линии нередко отходят от одного источника питания, так как питание их от разных секций, напряжение которых расходится по величине или фазе, вызывает нежелательные уравнительные токи (см., например, статью А. А. Глазунова, И. С. Бессмертного, Ф. Ф. Воронцова «Основные положения построения схем городских электрических сетей» в № 12 журнала «Электротехника» за 1952 г.). Только немногие схемы построения городских сетей, как, например, двухлучевая, предусматривают питание взаимно резервирующих кабелей от разных секций.

Если сеть построена так, что взаимно резервирующие кабели присоединены к одной секции сборных шин питающего распределительного устройства, то возможны только две схемы: либо с двумя системами сборных шин и одним выключателем на цепь, либо с двумя системами сборных шин и двумя выключателями на цепь. К последней схеме и относится схема Л. И. Двоскина «со 100% перемычкой между линиями».

Удвоение числа выключателей для всех линий распределительной сети представляется совершенно неприемлемым, независимо от подсчетов, приведенных в статье автора, тем более что в эти подсчеты неизбежно придется внести серьезные поправки.

Возможность коренного изменения схемы и конструкции распределительных устройств б и 10 кв электростанций всецело зависит от измерения принципов построения распределительных сетей. Для повышения надежности работы тех и других совершенно необходимо принять схему построения городских сетей, при которой все потребители

питаются от взаимно резервирующих линий, присоединенных к разным секциям сборных шин одной станции или подстанции или к шинам разных подстанций.

В предложении Л. И. Двоскина имеется еще одна деталь — применение расщепленных реакторов. К сожалению, этот вопрос в статье недостаточно освещен для того, чтобы по нему можно было высказаться: неясно, как может отразиться на сети возможная разность напряжений между секциями и насколько велика эта разность; каковы могут быть потери мощности в реакторах, учитывая необходимость ограничить токи короткого замыкания.

Предложенная автором конструкция распределительного устройства представляется мало приемлемой. Мы еще хорошо помним высказывания Л. И. Двоскина о недопустимости расположения соединительных шин над служебными проводами, между тем этот недостаток в полной мере присущ конструкции, представленной на рис. 9 и 10.

Все сказанное не позволяет считать предложение Л. И. Двоскина пригодным для реализации. Необходимо еще много поработать над общей проблемой построения городских сетей, в которую в качестве органического элемента входит выбор схемы распределительных устройств.

Схемы построения городских распределительных сетей должны быть типизированы так же, как типизированы схемы и конструкции распределительных устройств станций и подстанций. До тех пор, пока распределительные устройства будут проектироваться так, чтобы они могли быть пригодны при любой схеме сети, трудно ожидать получения надежных и экономичных решений.

**Кандидат техн. наук,  
доц. Н. Н. КУВШИНСКИЙ**

**Московский энергетический институт  
им. Молотова**

Л. И. Двоскин правильно отмечает, что практически все современные тепловые станции с распределением энергии преимущественно на генераторном напряжении имеют схему электрических соединений с двумя системами сборных шин и одним выключателем на каждом присоединении. Он правильно также отмечает известные эксплуатационные и конструктивные недостатки этого типового решения и предлагает новую схему, тесно связанную с конструкцией распределительного устройства.

Предлагаемый Л. И. Двоскиным переход на одну схему сборных шин при небольшом числе присоединений к одной из секций коренным образом решает задачу повышения надежности и упрощения конструкции распределительного устройства. Резервирование питания линий генераторного напряжения также является необходимым, но оно не должно быть 100-процентным, как это показано в предлагаемой схеме. В заводских сетях резервирование будет весьма ограниченным, а в городских сетях оно необходимо в еще меньшей степени. Если же ограничить степень резервирования, то предлагаемая Л. И. Двоскиным конструкция распределительного устройства окажется, как это будет показано ниже, нерациональной.

Значительное сокращение числа присоединений к одной секции сборных шин достигнуто путем присоединения всех линий секции через один групповой расщепленный реактор с номинальным током 2 000...3 000 а. К такому реактору через выключатели присоединяется от 18 до 22 линий.

Как известно, нормальная пропускная способность кабельных линий 6 кв составляет 400...600 а. Приведенное же в предлагаемой Л. И. Двоскиным схеме число присоединенных линий дает среднюю нагрузку на линию 80...150 а, т. е. даже при 100-процентном резервировании число линий, присоединяемых через групповой реактор, следует сократить в 2...2,5 раза, а в реальных условиях и еще больше.

Резервирование линий путем присоединения их выключателями к различным групповым реакторам приводит к неравномерной загрузке ветвей реактора и, следовательно, к невозможности полностью реализовать одно из преимуществ расщепленного реактора — понижение падение напряжения в его ветвях. Более того, в предлагаемой Л. И. Двоскиным схеме совершенно не используется другое основное его преимущество — ограничение токов корот-

кого замыкания в том случае, когда они протекают по обеим ветвям реактора в одном направлении. Все это показывает, что предлагаемая схема не позволяет полноценно использовать расщепленный реактор, ввиду чего последний в этой схеме не имеет явных преимуществ перед индивидуальным нерасщепленным линейным реактором.

Применение группового расщепленного реактора тесно связано с предлагаемой Л. И. Двоскиным конструкцией распределительного устройства. Однако первый этаж этого распределительного устройства, даже при том чрезмерном количестве ячеек КРУ, которое принято, хорошо использован только по длине. Наличие между ячейками КРУ прохода, достигающего 4 м, свидетельствует о явном недоиспользовании здания по ширине. При компоновке распределительного устройства не учтен выключатель в перемычке между генератором и групповым реактором (схема на рис. 5), целесообразность применения которого правильно обоснована автором. При установке этого выключателя и меньшем количестве ячеек КРУ первый этаж распределительного устройства будет использован еще хуже.

**Выводы.** 1. Автор своевременно пытается найти лучшее решение, чем существующая типовая схема; он правильно выбрал путь, на котором надо искать решение, позволяющее применить одну систему сборных шин на электростанциях с установленной мощностью до 100 тыс. квт, с генераторным напряжением 6 кв и распределением энергии преимущественно на генераторном напряжении.

2. Использование расщепленного реактора даст лучшие результаты, если его применить не в линейных цепях, а в качестве секционного в сочетании с трансформатором связи с системой.

3. При одной системе сборных шин в большинстве случаев будет необходимо сохранить питание части линий секции при ревизии или аварийном отключении последней. Желательно также сохранить питание любой линии при ревизии ее электрических аппаратов аналогично тому, как это имеет место в отношении линий повышенных напряжений.

4. Конструкция распределительного устройства генераторного напряжения должна быть достаточно гибкой, чтобы можно было присоединять к секции как один, так и два генератора, а также большое и меньшее количество линий генераторного напряжения.

5. При проектировании новых электростанций следует ориентироваться на применение в сетях генераторного напряжения выключателей типа ВМГ-133.

### Инж. С. Н. СЕМЕНОВ, инж. Е. А. БУГРИНОВ

Мосэнергопроект

В своей статье Л. И. Двоскин упоминает об имевших место попытках перехода на схему с групповыми сборками. Однако он не указывает, что этот переход был вызван желанием избежать установки на линиях большого числа мощных выключателей, которые выбирались по току короткого замыкания без учета линейных реакторов. Схема с групповыми сборками позволяла устанавливать на линиях 6 и 10 кв мало мощные выключатели, и в этом заключалась целесообразность ее применения.

Однако в эксплуатации эта схема себя не оправдала и не получила распространения. Основной ее недостаток состоит в том, что при выходе из работы групповых выключателей и реакторов одновременно отключаются все потребители, питающиеся от групповой сборки. Таким же недостатком обладает и схема, предлагаемая Л. И. Двоскиным, в которой все десять переактивированных линий питаются от двух групповых сборок с одной системой шин, присоединенных к сборным шинам через групповой реактор.

При такой схеме любое повреждение или ревизия, или ремонт аппаратуры (система сборных шин, групповой выключатель, реактор и четыре разъединителя) приводит к отключению всех десяти линий, пропускная способность которых составляет около 22 000 квт. Повреждение же или ремонт на одной групповой сборке вызывает отключение пяти линий, присоединенных к этой сборке.

Число последовательно включенных коммутационных аппаратов (выключателей и разъединителей) в схеме, предлагаемой Л. И. Двоскиным, в 2 раза больше, чем в типовой схеме с двумя системами шин и с индивидуальным питанием потребителей; следовательно, количество повреж-

дений и отключений потребителей при этой схеме будет больше, а релейная защита линейных присоединений — сложнее. Предлагаемая автором схема предусматривает 51 выключатель (12 типа МГГ-229, 9 типа МГГ-10 и 30 ВМГ-133), в то время как типовая схема предусматривает 45 выключателей (12 типа МГГ-229, 3 МГГ-10 и 30 ВМГ-133). Установка дополнительных выключателей на ответвлениях, пред назначаемых для резервного питания потребителей непосредственно от генераторов, усложняет схему, делая ее менее надежной, чем типовая схема с двумя системами шин.

Схема, предлагаемая Л. И. Двоскиным, не позволяет использовать всю мощность генераторов для питания потребителей на генераторном напряжении, так как nominalnyy tok groupovogo reaktora raven 2 000 a, a nominalnyy tok generatora sostavlyet okolo 2 900 a. Между tem omyt raboty gorodskikh elektrostantsij pokazывает, chto vse vyrabatymayimi imi energiyu raspredelyayetsya na generatornom naprjazhenii i transformatory svazi ispolzuyutsya lyshch pri remonta i avaryijskix rezhimakh.

В настоящее время требования в бесперебойности питания потребителей повышаются, так как даже кратковременные отключения потребителей приводят к большой недовыработке продукции. В связи с этим в ряде случаев целесообразно пойти на дополнительные затраты. Предлагаемая автором схема идет в разрез с этими требованиями и потому не может быть рекомендована.

В табл. 2, приведенной в статье Л. И. Двоскина, имеются ошибки. Стоимость одной камеры комплектного распределительного устройства автором принята равной 10 500 руб., в то время как стоимость такой камеры, изготавляемой Запорожским трансформаторным заводом для сетевых и промышленных установок, составляет в действующих ценах около 17 800 руб. Комплектные же распределительные устройства, изготавляемые заводом «Электрощит», стоимость которых соответствует принятой автором, предназначаются для собственных нужд электростанций, и возможность применения их для электрических сетей автором не проверена. Стоимость реакторов 1 000 a, 10% для типовой схемы принята автором равной 10 600 руб., в то время как в действительности она составляет 10 560 руб.

Если в данные, приведенные в табл. 2, внести необходимые исправления, то предложенная автором схема по экономическим показателям не будет иметь преимуществ перед типовой схемой.

Автор справедливо критикует типовые трехэтажные распределительные устройства. Применение на линиях легких выключателей, рассчитанных с учетом реакторов на сравнительно небольшие токи короткого замыкания, позволяет создать компактные распределительные устройства, применить более широко индустриальные методы строительно-монтажных работ и внедрить отдельные сборные элементы. Но это не было использовано при проектировании типового трехэтажного распределительного устройства.

Но и предлагаемая Л. И. Двоскиным конструкция распределительного устройства также неудачна и имеет ряд недостатков: коридор на третьем этаже позади выключателей не вызывается необходимостью, ошиновка между выключателями и шинными разъединителями удлинена, проходные изоляторы ошиновки за реактором обозреваются с трудом, реакторы размещаются во втором этаже, в то время как их целесообразно разместить в первом этаже, и другие недостатки. Линия на внедрение комплектных распределительных устройств является правильной. Но делать это необходимо не за счет ухудшения надежности и бесперебойности питания потребителей.

Для уменьшения распределительных устройств генераторного напряжения электростанций необходимо укрупнять отходящие к потребителям линии и предусматривать глубокий ввод этих линий в цеховые или районные линейные пункты. На линейных пунктах должны применяться исключительно комплектные распределительные устройства. Помимо уменьшения распределительных устройств, это даст большую экономию кабелей. Для обеспечения надежности питания укрупненные линии должны присоединяться непосредственно к главным сборным шинам питающих центров. Укрупнение отходящих линий 6 и 10 кв уменьшит общее количество коммутационной аппаратуры, что позволит в ряде случаев перейти на одну систему шин.

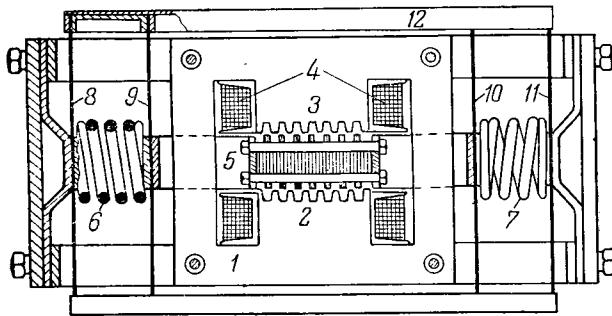


# По страницам технических журналов

## НОВАЯ КОНСТРУКЦИЯ ДВИГАТЕЛЯ С ГОРИЗОНТАЛЬНО ВИБРИРУЮЩИМ ЯКОРЕМ

В отличие от известных конструкций вибродвигателей с частотой 100 гц описываемый двигатель дает колебания частоты 50 гц и допускает изготовление систем мощностью до 1,5 квт.

Характерными особенностями конструкций (см. рисунок) являются настройка якоря на собственную механическую частоту 50 гц и зубчатость статора и якоря. В обесточенном состоянии якорь располагается так, что его зубцы приходятся между зубцами статора. При включении обмотки на синусоидальное напряжение под воздействием первой полуволны якорь отходит вправо или влево на ширину зубцового шага до совпадения зубцов. Во второй полупериод листовые и спиральные пружины возвращают якорь в исходное положение. Следующая за первой полуволной тока тянет якорь в противоположную сторону, чему способствует и резонансная настройка якоря на частоту сети. Путем надлежащего выбора числа зубцов можно осуществить изменение тягового и ударного усилия, соответствующее диапазону мощности 0,7...1,5 квт. С увеличением числа зубцов растет и тяговое усилие, а ударное падает.



Принципиальная схема вибродвигателя.

— пакеты стали статора; 2 и 3 — зубчатка полюса; 4 — возбуждающая обмотка; 5 — якорь; 6 и 7 — спиральные пружины; 8, 9, 10 и 11 — листовые пружины; 12 — направляющие линейки.

Существенным для успеха предложенной конструкции явилось удачное решение в установке опорных подшипников, допускающих горизонтальное перемещение якоря при малом воздушном зазоре (0,2...0,3 мм), что резко снижает реактивную составляющую тока.

Якорь зажат между двумя листовыми пружинами 9 и 10, которые в свою очередь амортизируются спиральными пружинами 6 и 7, укрепленными на крайних листовых пружинах 8 и 11.

Концы листовых пружин укреплены в направляющих линейках 12, имеющих небольшую свободу в вертикальном направлении, что обеспечивает возможность сокращения пружин. Даже при наличии значительных горизонтальных сил якорь не может переместиться больше чем на один зубец. Каждая пружинящая сторона воспринимает половину тяговых сил.

Особым преимуществом конструкции является возможность перегрузки якоря до полного останова без опасения его чрезмерного перегрева. Вибродвигатели найдут применение в приводах, использующих быстро чередующиеся поступательные движения без механического их преобразования; сюда можно отнести компрессоры, масло-водонасосы, пульверизаторы, сита, клепальные молоты, бетонотрамбовщики щетки, пилы и т. п.

Выпущенная серия вибродвигателей была применена в паркетошлифовщиках, что позволило производить шлифовку в узких щелях.

(ETZ, т. 5, № 5, стр. 173—174. 1953. Н. Volhardt)

Инж. А. В. МИХАЛКОВ  
ЭНИН АН СССР

## ПОДВОДНЫЙ КАБЕЛЬ ЧЕРЕЗ ЛАМАНШ

Для объединения электрических сетей Англии и Франции проектируется прокладка кабельной линии высокого напряжения между Дувром и Кале. Это позволит снизить потребную мощность электростанций объединенной системы и уменьшить необходимый резерв мощности. Кабели должны связать между собой британскую сеть 132 квт и французские сети 220 и 90 квт.

По данным, приведенным в реферируемой статье, в конце 1951 г. общая мощность электрических станций Франции составляла 12,6 млн. квт, из которых на долю гидроэлектрических станций приходилось около 6,8 млн. квт. В Англии в начале 1952 г. общая мощность паровых электростанций равнялась 14,2 млн. квт, в то время как мощность гидроэлектростанций составляла всего лишь 0,2 млн. квт. При объединении электрических систем этих стран энергия, производимая паровыми электростанциями Англии, в периоды маловодья может экспортirоваться во Францию; в свою очередь гидростанции Франции в периоды зимних провалов графика могут быть использованы для производства электроэнергии, передаваемой в Англию, что позволит уменьшить расход дефицитного в Англии угля.

Несовпадение максимумов нагрузки в обеих странах, обусловленное разницей в поясном времени и различием уклада жизни, создает дополнительные ресурсы мощности.

Было признано, что достигнутый в настоящее время уровень техники передачи электрической энергии недостаточен, чтобы электропередачу через Ламанш осуществить с помощью постоянного тока высокого напряжения. Поэтому передача будет осуществляться трехфазным переменным током 50 гц.

Учитывая все выгоды, которые дает объединение систем обеих стран, авторы проекта считают, что прокладка подводного кабеля через Ламанш экономически оправдывает себя; они полагают, что будут достигнуты существенная экономия топлива и снижение стоимости электроэнергии, если передаваемая мощность составит по крайней мере 2 000 мгвт.

Однако первоначально предполагается проложить четыре одножильных кабеля 132 квт сечением 160 мм<sup>2</sup> каждый с общей пропускной способностью 100 мгвт. Прокладку кабеля предполагается закончить в 1956 г. Относительно небольшая величина передаваемой мощности обуславливается ограниченной пропускной способностью электрической сети северной части Франции.

Если окажется возможным, то по четвертому (резервному) кабелю будет производиться экспериментальная передача энергии постоянным током с использованием морской воды в качестве обратного провода.

В настоящее время для изоляции кабелей дальней связи применяется политетен. Этот материал был успешно применен и для изоляции силовых кабелей при напряжениях до 11 квт. Преимуществом политетена является его водонепроницаемость. Однако размер политетеновой изоляции кабеля 132 квт будет таким, что вследствие перемещений при нагревании и охлаждении в ней будут образовываться пустоты, что может привести к пробою.

В подводных кабелях связи применяется также бумажная изоляция. Но и в ней при охлаждении свинцовой оболочки кабеля, претерпевшей необратимую деформацию при нагревании, могут образовываться пустоты. Чтобы избежать этого, применяется пропитка бумажной изоляции высоковольтных кабелей маслом или газом (обычно азотом) под давлением.

Применение в данном случае маслонаполненного кабеля исключается ввиду невозможности подпитывать его маслом в промежуточных пунктах линии. Поэтому было решено применить газ под давлением. Вследствие большой длины кабеля полную пропитку предполагается произвести перед покрытием кабеля свинцовой оболочкой.

Маслонаполненный подводный кабель длиной 5,5 км между Швецией и Данией был проложен с применением буксируемых пловучих барабанов. Этот способ может быть использован и для прокладки кабеля через Ламанш, хотя возникает опасение, что приливы, отливы и сильные штормы в Дуврском проливе могут затруднить маневрирование тяжело нагруженного барабана.

Серьезные трудности могут возникнуть при сращивании кусков кабеля, так как судно, на котором будут выполнены монтажные работы, должно будет оставаться в не-подвижном состоянии в течение нескольких дней.

Для предотвращения повреждений кабеля у скалистых берегов концы его должны быть защищены тяжелой броней. Проложенный между материком и о. Уайт трехфазный кабель 33 кв сечением 160 мм<sup>2</sup> имеет внешний диаметр вместе с броней 150 мм. Так как в данном случае диаметр кабеля должен быть еще больше, его транспортировка будет связана с большими трудностями. Поэтому решено концы кабеля вывести в море на некоторое расстояние от берега на решетчатых стальных опорах, сооружаемых на сваях таким образом, чтобы кабель спускался вертикально в воду.

Несмотря на то, что броня однофазных кабелей, которые должны быть проложены на расстоянии 900 м друг от друга, будет выполнена из немагнитной стали, потери в ней могут оказаться сравнительно большими. Но их можно снизить, применив конструкцию, принятую для однофазных кабелей подводной линии в Голландии. Под свинцовой оболочкой этих кабелей располагается концентрический проводящий слой, сечение которого равно сечению меди кабеля. Протекающий в проводящем слое ток

создает магнитное поле, которое компенсирует поле брони, в результате чего потери в броне значительно снижаются.

В случае передачи энергии постоянным током металлический проводящий слой может быть использован в качестве обратного провода.

Зарядная мощность кабеля переменного тока 132 кв составит более 3 тыс. ква/км. При длине кабеля более 50...60 км потребуется установка компенсирующих устройств. Так как при подводном кабеле осуществить эти устройства в промежуточных пунктах линии нельзя, они будут включаться на одном или обоих концах кабеля, и система будет работать близко к пределу устойчивости.

При передаче энергии постоянным током между полюсами напряжение может быть принято равным 400 кв, а следовательно, пропускная способность электропередачи через Ламанш при четырех кабелях будет увеличена в 4...5 раз.

Должно быть проверено, не нарушит ли внешнее магнитное поле кабеля нормального действия судового навигационного оборудования и аппаратуры для обнаружения мин.

**Инж. А. И. ГЕРШЕНГОРН**

(The Engineer, т. 194, № 5055, стр. 792, 1952, J. H. M. Sykes).



## Хроника

### Годовые итоги научно-исследовательских работ на конференции МЭИ им. Молотова

23—27 марта 1954 г. в Московском энергетическом институте им. Молотова была проведена научно-техническая конференция по итогам научно-исследовательских работ 1953 г.

Открыл конференцию председатель научно-технического общества МЭИ заслуженный деятель науки и техники, проф. Г. Н. Петров. Общую оценку выполненной ОНИР и кафедрами МЭИ в истекшем году работы дал на пленарном заседании конференции заместитель директора института член-корр. АН СССР В. А. Кириллин, который особо отметил: комплекс исследований, проводимых на гидродинамической модели МЭИ под руководством В. А. Веникова и связанных с проектированием систем электропередачи Куйбышев—Москва; гидравлические исследования под руководством С. М. Слышского модели турбинного блока Сталинградской гэс; работы кафедры радиотехнической электроники под руководством И. В. Лебедева и ряд других исследований.

Пленум конференции заслушал доклады: доктора физ.-матем. наук, проф. В. А. Фабриканта и члена-корр. АН СССР М. А. Стыриковича. В докладе «Некоторые физические вопросы энергетики» В. А. Фабриканта сопоставил результаты новейших физических исследований, в частности в области явлений сверхпроводимости, с некоторыми широко распространенными представлениями и положениями в энергетической науке и технике. В общих чертах он охарактеризовал далеко выходящие за привычные рамки современной энергетики масштабы неиспользованных человечеством мощностей, которые таит в себе природа. Перед энергетической наукой, перед энергетикой вырисовываются достаточно определенные и заманчивые перспективы использования новейших открытий. На этом пути стоит еще немало труднейших задач, и физики своими дальнейшими исследованиями и экспериментами обязаны устранить еще много препятствий; но и энергетическая наука и инженерно-конструкторская мысль не должны оставаться на старых позициях — в развитии науки и техники не раз наступали периоды, когда приходилось оставлять старые, хорошо обжитые крепости для успешного продвижения вперед. Энергетическая теоретическая мысль в наше время должна упорно продвигаться на встречу будущему, на соединение с аванпостами передовой физической науки.

Доклад М. А. Стыриковича был посвящен теме: «Пути развития мощных теплоэлектроцентралей».

Работа конференции проводилась в нескольких секциях: электроэнергетической, гидроэнергетической, электромеханической, электрификации промышленности и транспорта, электровакуумной техники и приборостроения, механико-машиностроительной, теплотехнической, физико-математической, социально-экономической. На секциях было обсуждено более 80 докладов.

На электроэнергетической секции (председатель проф. А. М. Федосеев) были заслушаны доклады: проф. П. Г. Грудинского «Анализ и выбор схем электрических соединений для мощных электростанций», кандидата техн. наук, доц. П. В. Борисоглебского «К теории короны постоянного тока на проводах», кандидата техн. наук Л. Г. Мамиконянца «Включение синхронных машин на параллельную работу способом самосинхронизации», кандидата техн. наук, доц. В. М. Маранчака «Защита от замыканий на землю генераторов, работающих в блоке с трансформатором», кандидата техн. наук, доц. С. В. Страхова «Метод расчета переходных процессов в электрических системах при переменных и постоянных скоростях вращения роторов машин», доктора техн. наук, проф. В. А. Веникова «Исследование режимов дальних передач на динамической модели», инж. И. В. Литкенс «Экспериментальные и аналитические методы определения требований к регуляторам возбуждения, предназначенным для генераторов, работающих на дальние передачи».

На гидроэнергетической секции (председатель проф. С. В. Избаш) было заслушано несколько докладов, в том числе доклад доктора техн. наук, проф. Т. Л. Золотарева «Вопросы работы сверхмощных гэс в объединении энергосистем».

На электромеханической секции (председатель проф. С. М. Брагин) в числе докладов были: кандидатов техн. наук В. В. Когена и А. И. Доцгина «Ограничение резонансных перенапряжений на емкости продольной компенсации дальних электропередач», кандидата техн. наук, доц. П. А. Варлашкина «Расчет магнитных усилителей», доктора техн. наук, проф. В. А. Привезенцева «Новые виды межвитковой изоляции», кандидата техн. наук, доц. М. В. Липковского «Бесконтактное регулирование напря-

жения силовых трансформаторов», кандидата техн. наук, доц. А. В. Иванова-Смоленского «Физическое моделирование как метод исследования электрических машин».

На секции *электрификации промышленности и транспорта* (председатель проф. Д. П. Морозов) кандидат техн. наук, доц. А. Д. Степанов выступил с докладом «Новые схемы автоматического регулирования дизель-генератора тепловоза», кандидат техн. наук, доц. Н. Н. Дружинин посвятил свой доклад вопросам теории электропривода непрерывных станов горячей прокатки. На секции были заслушаны также и другие доклады.

На секции *электровакуумной техники и приборостроения* (председатель кандидат техн. наук Г. М. Жданов) с докладами выступили: доктор техн. наук, проф. К. М. Половинов («Вращение плоскости поляризации сантиметровых

волны и другие эффекты, обусловленные гиromагнитными явлениями»), доктор техн. наук А. В. Нетушил («Электролитическая ванна для моделирования плоскопараллельных полей с произвольными граничными условиями»), кандидат техн. наук Ю. М. Шамаев («Новые методы осциллографирования сверхвысоких частот») и др.

Работа секций проходила в обстановке активного участия членов секций, в выступлениях которых содержалась критика отдельных положений по заслушанным докладам. Пленарное заседание конференции посетило почти 500 чел., из них более 150 представителей различных научно-исследовательских и проектных организаций, промышленных предприятий и вузов Москвы, Ленинграда, Киева, Харькова, Тбилиси, Еревана, Баку и других городов страны.

Д. Р.

## Заслуженный деятель науки и техники Л. И. Сиротинский К 75-летию со дня рождения

Леонид Иванович Сиротинский родился в апреле 1879 г. на Украине в г. Николаеве. После окончания гимназии (1897 г.) он поступил в Петербургский университет. Закончить университет ему, однако, не удалось, в связи с тем, что в 1899 г. он был арестован за участие в студенческих демонстрациях. Исключенный из университета, Леонид Иванович был принужден заканчивать высшее образование уже за пределами России — в Льежском электротехническом институте. По окончании института (1903 г.) он сразу вернулся на родину и принимал участие в революционном движении 1904—1905 гг.

Педагогическая и научная деятельность Л. И. Сиротинского началась в 1907 г., когда он принял непосредственное участие в создании первого в России среднего электротехнического училища в Москве (ныне Московский энерготехникум). В нем Леонид Иванович проработал 25 лет.

В 1917 г. Л. И. Сиротинский приступил к чтению лекций в Московском высшем техническом училище, а затем в Московском энергетическом институте им. Молотова. Здесь Л. И. Сиротинский провел большую работу по развитию электротехнического образования.

Им были созданы новые курсы и написаны неоднократно переиздававшиеся учебники: «Электрификация железных дорог дальнего следования» (1917 г.), «Перенапряжения и защита от перенапряжений» (четыре издания 1923—1937 гг.), «Основы техники электрического освещения» (три издания 1924—1934 гг.).

Л. И. Сиротинским организована кафедра техники высоких напряжений МЭИ; руководя ею, он создал для этой кафедры первоклассные лаборатории, позволившие развернуть серьезную научно-исследовательскую работу. Только за последние годы сотрудниками кафедры под руководством Л. И. Сиротинского проведен ряд крупных работ, в том числе: «Защита вращающихся машин, работающих непосредственно на воздушные сети» (1945—1946 гг.), «Исследование индуктированных перенапряжений» (1947—1948 гг.), «Исследование внутренних перенапряжений в линии электропередачи Куйбышев — Москва» (1951—1953 гг.) и др.

В 1939—1945 гг. вышел в свет созданный Л. И. Сиротинским и его учениками трехтомный учебник «Техника высоких напряжений». Этот капитальный труд отражал многолетнюю плодотворную научно-педагогическую деятельность Л. И. Сиротинского. В 1951—1953 гг. первые два тома этой книги вышли вторым изданием; в настоящее время Леонидом Ивановичем подготавливается выпуск третьего тома.



В 1921 г. Л. И. Сиротинский принимал участие в создании Всеобщего электротехнического института им. Ленина. Вплоть до 1932 г. он был руководителем созданного им Отдела высоких напряжений ВЭИ, а в настоящее время является консультантом этого отдела и осуществляет научное руководство рядом крупнейших лабораторий Института.

В 1950 г. за разработку и внедрение отечественных вентильных разрядников Л. И. Сиротинскому совместно с группой работников ВЭИ и завода «Пролетарий» была присуждена Сталинская премия.

С 1923 г. Л. И. Сиротинский являлся членом Центрального электротехнического совета, через который проходили проекты электростанций и сетей ГОЭЛРО. В качестве члена ЦЭС и консультанта Главэнерго он участвовал в экспертизах крупнейших сооружений: Днепростроя, Свирьстроя, Стalingрадской гэс, сети Донбасса и др. В последние годы Л. И. Сиротинский принимал участие в экспертизе проекта электропередачи Куйбышев — Москва.

Л. И. Сиротинский много внимания уделял созданию различных нормативных документов.

Леонид Иванович в течение многих лет ведет большую общественную работу, в том числе и по распространению электротехнических знаний. Он был членом президиума и товарищем председателя Электротехнического общества, затем председателем секции электрических станций, подстанций и линий электропередачи МОНITOЭ; в течение ряда лет он работал председателем научно-технического общества МЭИ.

Правительство высоко оценило выдающиеся заслуги Л. И. Сиротинского, наградив его двумя орденами Ленина, орденом Трудового Красного Знамени, орденом Знак Почета и медалями.

За плодотворную научно-педагогическую деятельность доктору техн. наук, проф. Л. И. Сиротинскому в 1942 г. было присвоено звание заслуженного деятеля науки и техники РСФСР.

Электротехническая общественность страны, отмечая выдающиеся заслуги Леонида Ивановича Сиротинского перед советской наукой и техникой, горячо приветствует его в связи с 75-летием со дня рождения и желает ему здоровья и дальнейшей плодотворной работы на благо Родины.

**М. Г. ЧИЛИКИН, М. Ф. КОСТРОВ, А. А. ГЛАЗУНОВ,  
В. В. МЕШКОВ, И. И. СОЛОВЬЕВ, В. А. ВЕНИКОВ,  
и др.**



# БИОГРАФИЯ

М. И. РАДОВСКИЙ. БОРИС СЕМЕНОВИЧ ЯКОБИ. БИОГРАФИЧЕСКИЙ ОЧЕРК  
264 стр., ц. 9 руб. 50 коп. Госэнергоиздат, 1953

Русскому ученому Борису Семеновичу Якоби принадлежат выдающиеся работы в области практических применений электричества. В связи с этим написано значительное число статей и очерков, касающихся различных сторон научной деятельности Якоби.

Ценность исследования в области истории техники определяется в значительной мере тем, насколько в нем глубоко и правильно вскрыто техническое содержание того или иного открытия и изобретения, понять исторические причины его появления и значение для дальнейшего развития науки и производства. Наряду с этим не менее важно освещение исторических условий творчества авторов этих открытий и изобретений. Только органическое сочетание технического и историко-экономического анализа позволяет создать действительно научные работы по истории науки и техники, в том числе и о деятелях науки и техники.

Книга М. И. Радовского имеет восемь глав. В первой главе описывается допетербургский период деятельности Якоби. Остальные семь глав отражают основные направления работ ученого: вторая и третья посвящены работам Якоби над электродвигателем и приводом судна, четвертая — изобретению гальванопластики, пятая — применению электричества в военном деле, шестая — работам в области электротелеграфии, седьмая — трудам по электрическим измерениям и метрологии. В последней главе освещается деятельность Якоби в Академии наук.

Такая разбивка материала книги дает основание предположить, что авторставил перед собой задачу дать представление о всем многогранном творчестве Якоби, о его научном и техническом вкладе в каждую разрабатывавшуюся им отрасль электротехники. Автором был привлечен обширный материал архива Якоби. Некоторые из документов (выступление Якоби в Дерптском университете, письмо к редактору журнала «Библиотека для чтения» О. И. Сеньковскому и некоторые другие) приведены в данной книге впервые и представляют несомненный интерес.

При разборе начального, допетербургского, периода (1801—1837 гг.) деятельности Якоби автору следовало, по нашему мнению, осветить вопрос о том, под влиянием каких условий, в какой обстановке и в каком направлении шло формирование молодого ученого. Ведь в первый период не только были заложены основы научных знаний Якоби, но и выкристаллизовались его творческие стремления и интересы, плодотворно проявившиеся позднее в годы работы в Петербурге. Именно в это время родилось у Б. С. Якоби влечеие к занятиям электромагнетизмом<sup>1</sup>. В биографии Б. С. Якоби вполне закономерно искать объяснения его постоянного стремления использовать достижения науки для целей производства (чего не было ни у Фарадея, ни у Ампера, ни у Ома и даже у Э. Х. Ленца). Без рассмотрения таких вопросов не могут быть поняты особенности творчества Якоби. К сожалению, они не нашли отражения в рецензируемой книге. Содержанием гл. 1 «Профессор Дерптского университета» (стр. 10—33) явилось сообщение некоторых биографических сведений об ученом и переложение его трех ранних работ: «Об использовании сил природы для нужд человека», вступительной лекции студентам Дерптского университета и речи на торжественном акте университета «О значении внутренних путей сообщения». Эти работы весьма любопытны. Однако почти полное их воспроизведение с небольшим авторским текстом, связывающим лишь отдельные цитаты, вызывает серьезные возражения. За этими выдержками и цитатами теряется в конце концов образ ученого.

И уже в гл. 1 проявляется один из основных недостатков рецензируемой книги — почти полное отсутствие анализа причин, голая констатация фактов. Вместо творческого подхода к исследуемой теме — обилие архивных выписок, длинных цитат, сцепленных фразами. Из 196 страниц чистого текста книги 167 страниц, или 85%, падает на цитирование и пересказ содержания различных статей, документов и других материалов.

<sup>1</sup> Как известно, Якоби изобрел электродвигатель в 1834 г.

В России, куда Якоби переехал в 1835 г., он попал в обстановку, относительно благоприятную для осуществления его научных замыслов. В своей вводной лекции студентам Дерптского университета Якоби отдает дань уважения высоким подвигам русских ученых, самоотверженно посвятивших себя служению Родине. Но и в этом выступлении и в речи на торжественном акте в университете он несколько восторженно говорит о будто бы прекрасных условиях, которые предоставлены в России ученым. В устах Якоби эти слова имели определенную почву и объяснение — лично Якоби в России получил гораздо больше того, что он имел в Пруссии.

Вызывает удивление, что М. И. Радовский, приведя массу цитат и выдержек из упомянутых выступлений Якоби, не дает им никакой критической оценки. Более того, он по сути дела присоединяется к ним, говоря о каком-то необычайном развитии науки и просвещения в период царствования Николая I. Открытие университетов, строительство обсерваторий, отмечаемые на стр. 24—25, в этом смысле автором явно переоценены. «В России, действительно, — сообщает М. И. Радовский, — ярко проявлялась характерная черта развития культуры того времени, «знамение эпохи», которое Якоби видел в мощном воздействии прогресса науки на общечеловеческую культуру». Далее, приведя выдержку из речи Якоби, в которой тот говорил о все растущем использовании достижений науки для нужд практики, М. И. Радовский продолжает: «Нетрудно себе представить, насколько все это соответствовало склонностям Якоби к прикладным наукам и насколько он был удовлетворен, оказавшись в стране, которая представлялась ему благодарным поприщем для них» (разрядка моя — М. Б.). Подобные утверждения можно встретить и на стр. 56. Известно, однако, что историческая обстановка царствования Николая I была весьма далека от идеализированной картины, нарисованной в книге. В области экономики проводилась политика, направленная на всемерную защиту и охрану интересов феодально-крепостнической верхушки, а в области просвещения все силы были брошены на подавление всякого свободомыслия и всяких стремлений к просвещению широких масс. Если учебные заведения и оказывались центром прогрессивных научных и общественных сил России, то это происходило вопреки воле царя и министра народного просвещения — яркого реакционера С. С. Уварова. В стране шла острая борьба двух культур — реакционной культуры самодержавия и передовой культуры, жившей интересами русского народа. Обойти молчанием эту сложную обстановку русской действительности того периода и облачить ее в единый радужный покров абсолютного прогресса — значит впасть в серьезную ошибку, которая не может быть квалифицирована иначе, чем отход от метода исторического материализма.

Вольно или невольно, но на протяжении почти всей книги автор проявляет непростительную близорукость, преподнося чисто объективистский материал, которому попросту не должно быть места в книге. На протяжении шести страниц (85—90) М. И. Радовский цитирует и пересказывает бездарные рассуждения С. А. Бурачека (по поводу перспектив развития флота при использовании электродвигателя), того самого Бурачека, который со страниц издававшегося им в середине прошлого века журнала «Маяк» писал, что поэзия Пушкина, Лермонтова, Рылеева — это «вертеп разбойников», что А. С. Пушкин «уронил русскую поэзию по крайней мере десятилетия на четыре», и т. п.

Без особой нужды, к месту и не к месту, автор цитирует всякие резолюции Николая I, доклады Уварова, приводит документы, которые должны свидетельствовать о покровительстве наукам со стороны известного душителя прогресса — николаевского министра финансов Е. Ф. Канкрина (см. стр. 58, 59, 66—68, 75, 76, 119 и 122). Умиляясь подобному «высокому» вниманию к работам Якоби, авторы где не вскрывают истинных причин такого отношения.

Наивно было бы думать, как это следует из книги, что Николаем I и его окружением руководили некие гуманные цели развития науки. Действительные причины этого интереса были вполне определены: экономический и техничес-

ский рост соседних европейских стран и связанное с этим усиление их военной мощи заставляли самодержавие обратить внимание на новые научные открытия и изобретения в надежде применить их к военному делу. В этом-то и кроется причина сравнительно большого внимания, которое уделялось работам Якоби над практическими приложениями электричества; вследствие этого его работы имели относительно лучшее материальное обеспечение, чем работы других изобретателей и ученых того периода.

В гл. 3 речь идет не столько о работах Якоби, сколько о донесениях Комиссии, о докладах Уварова и т. п. (см. стр. 65, 78, 103, 119 и 122). Невольно складывается впечатление, что автор книги не смог оторваться от папки документов, собранных в архиве Якоби. Мы не против того, чтобы в книгах по истории техники приводились материалы, вышедшие из-под пера Николая I, Уварова и др., но только там, где это действительно необходимо, оправдано. В данном же случае для такого обильного цитирования нет никакой нужды. Биография Якоби не станет яснее, если после каждого этапа работы будут приведены рассуждения Уварова и надписи на них царя.

Но беда не только в нагромождении цитат. Некритическое отношение к ним автора, манера их подачи, какое-то ненужное смакование цитат придает книге апологетический, чуждый марксистско-ленинскому пониманию истории характер.

Посмотрим, как решена автором задача освещения технического содержания творчества Якоби.

Известно, что Борису Семеновичу Якоби — «гениальному электротехнику и изобретателю»<sup>2</sup> — принадлежат пионерские работы в различных областях электротехники, которые и дали право считать его одним из основоположников этой отрасли техники. Он изобрел электродвигатель (1834 г.), осуществил электропривод судна (1838 г.), изобрел гальванопластику (1838 г.), создал ряд новых конструкций стрелочных и электромагнитных телеграфных аппаратов, в том числе буквопечатающих (1850 г.), спроектировал и построил первые в мире практически действовавшие кабельные линии (1841—1843 гг.), выполнил выдающиеся работы в области военной электротехники, электрических измерений и метрологии. Якоби принадлежат и ценные теоретические труды. Все это говорит об огромном диапазоне и новаторском характере творчества ученого.

В книге М. И. Радовского, однако, даже не упоминается примерно половина работ Якоби по электротехнике (создание второй модели двигателя, открытие явления обратной э. д. с., исследование электромагнитов, работы по созданию сухопутных мин и пр.). Целиком опущены весьма существенные труды Якоби по металлурии платины и алкоометрии.

Уже одно их отсутствие делает работу М. И. Радовского неполной, хотя объем ее давал надежду на всестороннее освещение научно-технической деятельности Б. С. Якоби.

Но еще более снижает ценность книги то обстоятельство, что ни одна из работ Якоби, о которых автор все же пишет, не рассмотрена по существу и не проанализирована с технической точки зрения. Приведенные автором описания некоторых изобретений Якоби, объяснение принципа их действия даются автором не на основании личного изучения вопроса, а по высказываниям различных лиц. В подавляющем большинстве случаев автор ограничивается приведением пространных цитат, подчас без комментариев.

Игнорирование технического содержания трудов Якоби, его творческих методов привели автора книги к неправильной оценке и к неверной трактовке результатов основных работ Якоби. Это прежде всего относится к разбору трудов Якоби над электродвигателем, на освещение которых отведена значительная часть книги (стр. 32—124). Остался без ответа вопрос о том, почему именно Б. С. Якоби удалось создать практически пригодный электродвигатель, в то время как над этой проблемой работали до Якоби многие изобретатели в разных странах (Дж. Генри, Даль-Черго, В. Риччи, Ч. Педж, В. Стерджен). Из предшественников Якоби оказывается на двигатель одного Генри. Труды других изобретателей обходятся молчанием, между тем как только сравнение конструкций двигателей и рассмотрение

творческих приемов их изобретателей и помогают понять, почему именно Якоби удалось решить задачу создания электромагнитного двигателя.

Вместо этого М. И. Радовский пытается объяснить все только личностью самого ученого, его выдающимися способностями, талантом: «Якоби был наделен не только выдающимися изобретательскими способностями, но и талантом проникать в глубь изучаемых физических процессов» (стр. 44). Та же самая мысль повторяется на стр. 13, 47 и 53.

Объясняя причину того, что Якоби не воспользовался в своих работах открытым Э. Х. Ленцем в 1833 г. явлением обратимости электрических машин, а долгое время в качестве источника электроэнергии ориентировался не на электромагнитный генератор, а на гальванические элементы, М. И. Радовский уверяет, что «Якоби не избег участия многих своих современников, которые не были в состоянии оценить того, что, казалось, само давалось им в руки» (стр. 45). Оказывается все дело в «участии», а не в состоянии развития производительных сил! Между тем в 30—40-х годах 19 в. не было еще серьезных оснований сомневаться в достоинствах гальванических батарей. В сравнении с электромагнитными генераторами они казались экономически более целесообразными: они весьма просто изготавливались, сами по себе были дешевые. С другой стороны, в установке, даже далекой от мысли о централизованном производстве электроэнергии и передаче ее, выгодная эксплуатация электрогенератора была просто невозможна, так как для каждого генератора надо было ставить свой первичный двигатель. В свете сказанного понятно и объяснимо, что Якоби, как и его современники, ориентировался на гальванические элементы. Следует отметить, что в середине 40-х годов учений приступил к опыту над применением электрических генераторов (главным образом в электроминном деле). Им была создана интересная конструкция электромагнитного генератора. Этот факт в книге не отнесен.

Соответствующим образом подбирая и преподнося материалы из донесений «Комиссии для приложения электромагнетизма к движению судов по способу профессора Якоби», автор создает у читателей впечатление, что с самого начала деятельности Комиссия заведомо предвидела неуспех начатого дела.

М. И. Радовский расценивает результат работы Якоби над электроходом как неудачу изобретателя, взывшегося за неразрешимую задачу и поэтому потерпевшего поражение. На стр. 118 мы читаем: «...Сомнения, зародившиеся в Комиссии еще в 1838 г. после первого испытания электрохода, теперь усилились (1841 г.—М. Б.) и вскоре перед Комиссией встал роковой вопрос о целесообразности ее существования. Через год, не принесший утешительных результатов, прямо уже говорилось о ее ликвидации» (разрядка моя—М. Б.). И, далее (стр. 121): «На этом, четвертом, году своей работы Якоби и вслед за ним Комиссия пришли к непреложному выводу, что в имевшихся условиях выполнить возложенную на Комиссию задачу невозможно. Все намеченные планы рушились» (разрядка моя—М. Б.) (см. также стр. 101—103, 121 и 122). Действительно, Якоби не смог «заменить паровую машину другой, более верной, менее опасной и почти никаких издержек не требующей», как это от него ожидали Николай I, Уваров и др. Причиной этому были глубокие технико-экономические факторы.

«Исторические заслуги судятся не по тому, чего не дали исторические деятели сравнительно с современными требованиями, а по тому, что они дали нового сравнительно со своими предшественниками», — говорил В. И. Ленин<sup>3</sup>.

Но то новое, что дал Б. С. Якоби при работе над приводом судна, как раз и не заметил автор рецензируемой книги. Между тем период деятельности в Комиссии был одним из плодотворнейших в жизни Якоби. В это время он создал новую, вторую конструкцию электродвигателя, осуществил первое в мире плавание на судне, приводимом электродвигателем. Именно в связи со стоявшей задачей построения двигателя для электрохода Б. С. Якоби совместно с Э. Х. Ленцем осуществили фундаментальные исследования электромагнитов, которые в течение 30 с лишним лет оставались наиболее точными. В 1840 г. Якоби выполнил работу по теории электрических машин. В это же вре-

<sup>2</sup> С. И. Вавилов. Очерк развития физики в Академии наук СССР за 220 лет. Академиздат. 1945.

<sup>3</sup> В. И. Ленин. Собр. соч., изд. 4-е, т. 2, стр. 166.;

мия им было найдено количественное выражение для открытого еще в 1834 г. явления обратной э. д. с. и др. Эти выдающиеся научные результаты работы Якоби в значительной степени объясняются тем, что они были необходимы для решения практической задачи создания электротехника.

Касаясь работ Якоби над электромагнитными телеграфными аппаратами, М. И. Радовский пишет: «Не довольствуясь предложенными до него конструкциями, он начал совершенствовать существовавшие модели, имея в виду создать верный, надежный, быстродействующий и легко управляемый аппарат» (стр. 191—192). Против сказанного нечего было бы возразить, если бы перед этим было показано, какие конструкции были предложены до Якоби, а затем какие модели начал совершенствовать Якоби.

Известно, что в 30-х годах 19 в. наиболее целесообразная конструкция электромагнитного аппарата была создана изобретателем электромагнитного телеграфа П. Л. Шиллингом. Следовательно, автор имел в виду, что Якоби «начал совершенствовать» телеграфный аппарат с приемником — мультиплексором. Здесь мы опять сталкиваемся с недостаточным пониманием автором технической сути работ Б. С. Якоби.

Уже в самой первой конструкции своих телеграфных аппаратов ученым пришел к принципиально новому техническому решению, использовав электромагниты в активной части аппарата. Применение электромагнитов в телеграфных аппаратах знаменовало качественно новый шаг в электротелеграфии<sup>4</sup>. Как известно, и до сих пор электромагнит является основной частью всех телеграфных аппаратов. Следует отметить, что автор на стр. 192 вскорь говорит, что приемник пишущего телеграфного аппарата Якоби имел электромагнит, не показывая, однако, всю значимость и важность этого изобретения Якоби.

С первых же строк гл. 4, посвященной гальванопластическим работам Якоби, дается поверхностная трактовка изобретения гальванопластики только как счастливого случая, как удачи ученого (см. стр. 125 и 142). Акцентирование, сделанное на этом исходном моменте, неправильно ориентирует читателей в оценке той огромной работы Якоби, которая была выполнена им для создания гальванопластики как отрасли техники.

Это случайное наблюдение, сделанное Якоби в конце 1836 г. над характером поверхности медного осадка в гальваническом элементе, привело ученого к изобретению гальванопластики. Якоби сразу оценил громадные возможности явления электроосаждения металла для снятия различных копий. Но для того, чтобы можно было говорить о практическом применении электролиза, надо было изучить условия, влияющие на образование медного осадка, научиться управлять процессом — разработать технологию производства. 2 года — с 1836 по 1838 — ушло на создание гальванопластики! В начале 1839 г. ученыму удалось успешно разрешить задачу создания промышленного способа снятия гальванопластических копий. В этом и заключается величайшая заслуга Б. С. Якоби, который не только подметил и использовал явление осаждения металлов при электролизе, но и довел его до завершенного промышленного использования.

Сообщая те или иные факты, М. И. Радовский все время как бы скользит по поверхности явлений, не раскрывая их содержания. Приведем несколько примеров.

На стр. 42 можно прочесть: «...Заслуга Якоби в том, что на заре электротехники он разглядел важнейшие черты, составляющие технико-экономическую характеристику двигателя...» Но какие же это черты? Этого читатель так и не узнает из книги.

На стр. 80 написано: «Подробно остановился Фусс и на работе Якоби над элементами, отметив блестящие (разрядка моя — М. Б.) результаты, которые получил Якоби, помешая металлы, составляющие элемент, в разные жидкости...» Но что значит «блестящие»? Уменьшение поляризации, уменьшение внутреннего сопротивления или что-либо другое? Этого автор не поясняет.

В книге (стр. 79) дана выдержка из доклада Фусса Академии наук, в которой приводятся сведения об опы-

тах Якоби над конструированием электромагнитов с полыми трубками из мягкого железа. Этот опыт, по мнению Фусса, имеет «величайшее значение» при создании электродвигателя. М. И. Радовский, присоединяясь к Фуссу, отмечает: «Этот предмет занятий Якоби приобрел особое значение, когда решено было практически применить электродвигатель в судоходстве... На первом заседании Комиссии Якоби поставил этот вопрос во главу угла» (разрядка моя — М. Б.). Далее, по этому поводу следует выдержка из протокола Комиссии от 9 июля 1837 г. Однако из дальнейшего так и не стало ясно, какие следствия имела постановка вопроса о полых трубках «во главу угла», к каким выводам Якоби пришел после экспериментов с полыми трубками и т. п. Здесь, как и в других случаях, на которых мы не будем останавливаться, авторская оценка работ Якоби отсутствует. Автор без устали отмечает, цитирует, называет события, фразы, но не исследует, не дает научно-технического разбора предмета своей работы.

Обосновывая целесообразность работы Якоби над электродвигателем, М. И. Радовский основным доводом выдвигает то обстоятельство, что паровой двигатель будто бы «все более и более превращался в орудие торможения (разрядка моя — М. Б.) дальнейшего развития промышленности» (стр. 33, то же на стр. 16). Это в корне неверная трактовка места и роли парового двигателя в процессе развития производства. Действительно, с ростом промышленности на определенном этапе один паровой двигатель уже не мог удовлетворить всех потребителей двигательной силы. Противоречие между возможностями парового двигателя и нуждами производства привело к созданию двигателя внутреннего сгорания; организация централизованного производства электроэнергии дала возможность широко использовать электродвигатели. При всем этом паровой двигатель никогда не был «путами промышленности» (стр. 16 и 33). Он играл и продолжает играть до настоящего времени большую роль, являясь в определенных отраслях народного хозяйства (железнодорожный транспорт и др.) господствующим двигателем.

В книге имеется такое утверждение: «Как и его современники, Якоби строил первые линии телеграфа, проектируя подземный кабель» (стр. 201). Неясно, каких именно современников Якоби имеет автор в виду, но в других странах строительство телеграфных линий в основном началось со второй половины 40-х годов, причем в Англии, Баварии, Австрии, Америке, Бельгии строились главным образом воздушные линии. Единственно в Пруссии в 1849 г. были построены подземные кабельные линии, которые, однако, по свидетельству Якоби уже в 1851 г. начали заменять воздушными. В свете этого вряд ли автор имел основания утверждать, что современники Якоби строили подземные линии.

В гл. 2 М. И. Радовский пытается оправдаться работы Якоби по теории электрических машин. Приведя свои соображения относительно плодотворности сотрудничества Б. С. Якоби и Э. Х. Ленца, он ни единим словом не обмолвился об их совместных работах по исследованию электромагнита, но зато приписал им обеим работу одногого Якоби по теории электрических машин. Конечные результаты этого труда Якоби явились также частью его доклада на съезде Общества британских естествоиспытателей в Глазго. Поместив выдержки из этого доклада Якоби, автор пишет: «Достигнутые результаты, по мнению Якоби, и это он заявил на съезде, позволяют считать, что электромагнитным машинам открыт широкий простор для развития и прямой путь к внедрению их в производственную практику. Этому порукой является то, что отныне техника вместо слепой эмпирики вооружена четкими и научными представлениями (разрядка моя — М. Б.), дающими возможность руководствоваться при конструировании электрических машин определенными положениями» (разрядка моя — М. Б.). Последняя фраза просто загадочна, если иметь в виду, что из остального текста не ясно, какими же «представлениями» вооружилась техника и какими «положениями» руководствовались при конструировании электромашин. Приведенная перед этим цитата из работы Якоби выхвачена из основного текста и никак не пояснена автором. Она с большим трудом может дать представление о сути полученных ученым результатов даже специалисту, не говоря уже о широком читателе. Это, во-первых,

<sup>4</sup> Независимо от Якоби электромагнит в телеграфном аппарате был использован и С. Морзе, который получил первый патент на свой аппарат 20 июня 1840 г.

А, во-вторых, как можно писать, что после труда Якоби по электромашинам был открыт «широкий простор для развития и прямой путь к внедрению их в производственную практику», когда этот труд Якоби был только первым шагом в создании теории электромашин, широкая разработка которой началась лишь в 1870—1880 гг.

Рецензируемая книга, не содержащая подчас даже самых минимальных сведений о важных работах Якоби, перегружена второстепенными деталями. Автор не смог выделить основные, кардинальные моменты в деятельности Якоби и распылил свое внимание на менее существенные факты.

«Очень важным,— по мнению М. И. Радовского,— был вопрос о сроке полномочий Комиссии, который зависел от продолжительности задуманных опытов». Почему он был важным, так и осталось неясно, но рассуждению на эту тему отведены стр. 74—75. По каждому донесению Комиссии в 1837 г. (стр. 70), 1838 г. (стр. 111—112), 1839 г. (стр. 119—120) автор приводит сведения о выполнении сметы. Какой свет это может пролить на работы Якоби, если сами объекты, на которые расходуются деньги, читателю неизвестны? Значительное место в книге отведено обоснованию необходимости введения метрической системы мер. Якоби в его время действительно надо было затратить много сил для доказательства преимуществ метрической системы. Но зачем это делать в наши дни автору книги, да еще, например, в таких словах: «Разные черви и гады, присосавшиеся к народному телу, естественно, не были заинтересованы в установлении системы, затрудняющей обсчеты и обмеры, и яростно сопротивлялись ее введению» (стр. 216).

Мы не будем останавливаться на всех менее существенных недостатках. Ограничимся лишь указанием на

то, что в книге содержится ряд ошибочных фактических сведений. Работы П. Л. Шиллинга по электротелеграфии автор датирует почему-то демонстрацией телеграфного аппарата Шиллинга на Бонском съезде 1835 г., а не датой первой демонстрации аппарата в России (1832 г.). Шиллинг никогда не строил приписываемую ему автором линию Петербург — Петергоф (стр. 186). Неверно также сказано в книге (см. стр. 188), что работы по телеграфии были начаты Якоби со строительства линии Петербург — Царское Село, т. е. в 1843 г., Якоби прокладывал телеграфные кабели с гуттаперчевой изоляцией (стр. 163). Неточно описывается начало работ в России над гальваническими минами: опыты над сухопутными минами начали систематически проводить не с 1838 г., а с 1831 г. П. Л. Шиллинг не только «обратил внимание русского правительства» на эффективность электрического взрывания мин (стр. 158), а, как известно, уже в 1812 г. демонстрировал изобретенные им гальванические мины. С. П. Власов назван в книге «крепостной самоучка» (стр. 158). Это неточно. Известно, что С. П. Власов с отличием окончил в 1815 г. Медико-хирургическую академию, и т. д. и т. п.

В итоге рассмотрения данной книги приходится сделать заключение, что автору не удалось дать полноценный очерк о жизни и деятельности Якоби, как об этом сообщается в аннотации к книге. Фактические ошибки еще более усугубляют ее недостатки. Требования, которые предъявляет советский читатель к историко-техническим исследованиям, значительно выше уровня, достигнутого автором в его данной работе.

*Кандидат техн. наук М. Д. БОЧАРОВА  
Москва*

### Л. П. ПЕТРОВ. СХЕМЫ КОНТАКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

132 стр., ц. 4 руб. 75 коп. Госэнергоиздат, 1953.

Задача развития автоматизации производственных процессов во всех отраслях народного хозяйства СССР, поставленная партией и правительством, повышает значение издания книг, распространяющих опыт создания автоматических устройств. Одной из таких книг является и рассматриваемая книга. В ней описана работа 51 релейно-контакторной схемы автоматического управления широко распространенными производственными электроприводами. В ней также рассмотрены 21 узел сложных схем.

Книга содержит предисловие, введение и семь глав.

В первой главе «Схемы управления асинхронными короткозамкнутыми двигателями» описаны: основные операции по управлению короткозамкнутыми двигателями; схемы управления, осуществляющие автоматический пуск и торможение двигателей, и схемы управления многоскоростными асинхронными двигателями.

Во второй главе «Схемы управления асинхронными двигателями с фазовым ротором» изложены принципы автоматизации установок с рассматриваемыми двигателями и описаны нереверсивные и реверсивные схемы управления ими.

Третья глава «Схемы управления двигателями постоянного тока параллельного возбуждения» освещает принципы автоматизации установок с двигателями параллельного возбуждения и работу схем автоматического управления двигателями малой, средней и большой мощности.

Четвертая глава «Схемы управления двигателями постоянного тока последовательного возбуждения» указывает на особенности схем с двигателями последовательного возбуждения и дает описание схем малой, средней и большой мощности.

Пятая глава «Схемы управления двигателями постоянного тока смешанного возбуждения» сообщает об особенностях схем, включающих эти двигатели, и дает описание схем управления двухдвигательными приводами.

В шестой главе «Схемы управления синхронными двигателями» описана структура схем управления и даны схемы управления двигателями низкого и высокого напряжения.

Седьмая глава «Некоторые специальные узлы сложных схем управления» описывает некоторые схемы включения командааппаратов, узлы схем автоматического пуска, реверса и остановки, схемы подачи управляющих импульсов и цепей, а также счетно-импульсные схемы.

По утверждению автора он стремился дать лицам, начинающим специализироваться по электрооборудованию промышленных предприятий, материал для самостоятельного изучения типовых схем автоматического управления и схемных узлов. Книга писалась для студентов энерготехникумов и институтов той же специальности, которым она должна помочь научиться быстро разбираться в схемах релейно-контакторной автоматики.

Автор в основном достиг своей цели.

Описания работы значительного количества каталожных и типовых схем, а также схемных узлов достаточно кратки и ясны. Книга хорошо отредактирована и действительно может служить полезным материалом для самостоятельного изучения релейно-контакторных устройств начинающими специалистами и студентами.

Книга несвободна, однако, и от некоторых общих недостатков и неточностей, а также вызывает несколько частных замечаний, связанных с изложением работы той или другой схемы.

К общим недостаткам можно отнести отсутствие в книге общих разделов, которые целесообразно предложить описанию конкретных схем. Эти общие разделы особенно необходимы для накопления знаний начинающими специалистами и студентами.

Во-первых, целесообразно было бы указать, каким сравнительно простым требованиям производства удовлетворяют релейно-контакторные устройства.

Во-вторых, необходимо было бы остановиться на общих требованиях, предъявляемых к электроприводам с релейно-контакторным управлением. Эти требования: простота, надежность, гибкость и удобство управления, контроль исправности цепей, четкость действия в нормальных и аварийных режимах, правильное применение машин и аппаратов, удобство монтажа, эксплуатации и ремонта.

та, минимальная стоимость, минимальные габаритные размеры и некоторые другие.

В-третьих, следовало бы изложить общую методику изучения и описания работы схем автоматического управления. Очевидно, что изучение и описание работы схем управления нужно начинать с требований производственного процесса, затем переходить к исходному положению схем, рассматривать работу схем в нормальных режимах и, наконец, изучать и описывать возможные аварийные режимы и работу защиты.

В-четвертых, стоило бы кратко изложить основные принципы, которые используются при создании схем автоматического управления пуском, торможением и реверсом электродвигателей переменного и постоянного тока. Здесь имеются в виду принципы времени, скорости, тока и пути.

В-пятых, ценные были бы даже краткие указания по проектированию монтажных схем по заданным элементным, описанным в книге. Такая задача, очевидно, встанет перед начинающим электриком, если он попытается осуществить какую-либо схему на практике. Ему следует в этом отношении помочь.

В книге опущены устройства комплексной автоматизации и не рассмотрены схемы, включающие систему Г-Д, нашедшие применение в металлообработке, металлургии и других отраслях промышленности. Недостаточно освещены в книге вопросы применения малогабаритных аппаратов слаботочной промышленности и электронных реле, широко применяемых в сочетании с обычными релейно-контакторными устройствами.

Ниже приводятся некоторые замеченные недостатки и неточности частного характера.

1. Рекомендация, сделанная автором книги на стр. 13 по настройке максимальных реле, неточна. При рекомендуемой настройке две фазы обмотки статора асинхронного двигателя могут перегреться в том случае, если сгорит один предохранитель при врачающемся двигателе и работа будет продолжаться.

2. Автор книги принял установку описывать существующие схемы с недостатками, а не исправлять их. Катушки максимальных реле и нагревательные элементы тепловых реле в схемах фиг. 3, 6 и 14 включены нерационально. В схемах фиг. 17, 19, 29, 33 и др. контакты одного аппарата электрически присоединяются к различным полюсам или фазам сети управления, что ухудшает надежность схем.

3. На стр. 18 имеется неточное выражение, смысл которого заключается в том, что скорость двигателя изменяет направление «по инерции».

4. На стр. 46 необоснованно указывается, что при автоматическом управлении двигателями постоянного тока используются только два основных принципа управления (скорости и времени). На самом деле, при управлении двигателями постоянного тока применяются все основные принципы. Сам автор на следующей странице вынужден упомянуть принцип тока. Принцип путей также упоминается, но почему-то только в последней главе.

5. На фиг. 41 приведены механические характеристики электродвигателя последовательного возбуждения, часть которых искажена. Характеристики *C4*, *C4-a*, *C4-b* должны быть примерно прямоугольными, а изображены с заметной кривизной. Характеристика *P1* должна постепенно приближаться к оси ординат, а она пересекает ее. Характеристики *O* и *O4* должны иметь прогиб в обратную сторону в сравнении с прогибом изображенных кривых.

6. Утверждение автора на стр. 101 о редком применении непосредственного подключения возбудителя к ротору синхронного двигателя из-за высокого напряжения, появляющегося в роторе при пуске, следует считать несвоевременным. Такие схемы получают все большее распространение и являются прогрессивными вследствие их простоты и надежности.

7. Конкретность изложения работы многих схем можно было бы повысить, приведя хотя бы основные инженерные данные по применяемым аппаратам.

**Выводы.** Книга Л. П. Петрова заслуживает положительной оценки. Ее целесообразно переиздать с дополнениями и уточнениями. Весьма желательно несколько увеличить объем и тираж книги.

Цель, которую поставил перед собой автор книги в первом издании, должна быть расширена за счет изложения некоторых общих вопросов, касающихся управления электроприводами, что необходимо для специалистов, начинающих работать по электрооборудованию промышленных предприятий и студентов.

Можно рекомендовать включение в следующее издание книги описаний работы схем комплексной автоматизации с применением реле и контакторов. Целесообразно также ввести в книгу схемы, включающие электропривод по системе Г-Д и использующие электронные реле и малогабаритную аппаратуру связи.

**Кандидат техн. наук А. А. СИРОТИН**  
**Московский энергетический институт**  
**им. Молотова**

## Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике

**АЛЬПЕРТ Я. Л., ГИНЗБУРГ В. А., ФЕИНБЕРГ Е. Л. РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН.** 884 стр., ц. 33 руб. 65 коп. Гостехиздат.

**АСЕЕВ Б. П. ФАЗОВЫЕ СООТНОШЕНИЯ В РАДИОТЕХНИКЕ.** Изд. 2-е, 280 стр., ц. 9 руб. Связьиздат.

**АТАБЕКОВ Г. И. ДИСТАНЦИОННЫЙ ПРИНЦИП ЗАЩИТЫ ДАЛЬНИХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ.** 215 стр., ц. 9 руб. 75 коп. Изд. АН Арм. ССР.

\* **БАЛТИДАНОВ Л. Н. и ТАРАСОВ В. И. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИИ И ПОСТОДАЦИИ.** Изд. 2-е, переработ. т. 3. РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОМАТИЧЕСКОМ ВКЛЮЧЕНИИ ЛИНИИ И ТРАНСФОРМАТОРОВ. 160 стр., ц. 7 руб. 95 к. Госэнергоиздат.

**БРОНШТЕЙН И. Н. и СЕМЕНДЯЕВ К. А. СПРАВОЧНИК ПО МАТЕМАТИКЕ.** Изд. 3-е, переработ. 608 стр., ц. 13 руб. 90 коп. Гостехиздат.

**ВВЕДЕНСКИЙ А. А. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО В НАШЕЙ ЖИЗНИ.** 64 стр., ц. 1 руб. Гостехиздат.

\* **ВЕШЕНЕВСКИЙ С. Н. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК И СОПРОТИВЛЕНИЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ.** 328 стр., ц. 13 руб. 75 коп. Госэнергоиздат.

**ГОРОДЕЦКИЙ Г. М. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ.** 847 стр., ц. 12 руб. 15 коп. Гостехиздат УССР.

\* Звездочкой отмечены книги, по которым предполагается помещение рецензий.

**ЕГОРОВ К. П. ПЕРЕДАЧА ТЕЛЕВИЗИОННЫХ СИГНАЛОВ ПО ЛИНИЯМ ДАЛЬНЕЙ СВЯЗИ.** 36 стр., ц. 1 руб. Связьиздат.

**КАНАЕВ А. А. ОТ ВОДЯНОЙ МЕЛЬНИЦЫ ДО АТОМНОГО ДВИГАТЕЛЯ.** 192 стр., ц. 2 руб. 95 коп. Машгиз.

\* **КАПЦОВ Н. А. ЭЛЕКТРОНИКА.** Учебное пособие для государственных университетов. 468 стр., ц. 10 руб. 35 коп.

**КАРАНДЕЕВ К. Б. МОСТОВЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ. ТЕОРИЯ И РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МОСТОВЫХ СХЕМ.** 247 стр., ц. 12 руб. 20 коп. Гостехиздат. УССР.

**КОВАРСКИЙ Е. М. РЕМОНТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН.** 2-е доп. изд. 240 стр., ц. 6 руб. 35 коп. Госэнергоиздат.

**КОРСАК С. П. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВОДОНАГРЕВАТЕЛИ И ПАРОВЫЕ КОТЛЫ.** 127 стр., ц. 4 руб. 10 коп. Госэнергоиздат.

**КРАСВИКСКИЙ С. П. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ.** Стенограмма публичной лекции. 24 стр., ц. 45 коп. Издательство «Знание».

**КУЗНЕЦОВ П. В. МОНТАЖ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ.** 208 стр., ц. 5 руб. 30 коп. Госэнергоиздат.

**МИХАИЛОВ П. А. и НЕСТЕРОВ В. И. РЕМОНТ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ.** Под ред. Б. В. ДАГЕЛАЙСКОГО. 224 стр., ц. 7 руб. 5 коп. Госэнергоиздат.

**НОВЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ.** Сборник статей. Пер. А. М. БРОДСКОГО. Под ред. и со вступл. статьей Д. Д. ИВАНЕНКО. 394 стр., ц. 33 руб. 90 коп. Изд. иностран. литературы.

Цена 8 руб.

**ГОСЭНЕРГОИЗДАТ**

**ПРОДОЛЖАЕТСЯ ПОДПИСКА**

**на II полугодие 1954 г.**

**НА ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ**

# **ЭЛЕКТРИЧЕСТВО**

**ОРГАН АКАДЕМИИ НАУК СССР,  
МИНИСТЕРСТВА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ СССР  
И МИНИСТЕРСТВА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР**

*(Основан в 1880 г.)*

Журнал рассчитан на широкие круги инженеров и научных работников, ведущих работу в различных областях электротехники, и ставит своей задачей помогать им в разработке и решении важнейших практических и теоретических вопросов, возникающих в работе по электрификации всех отраслей народного хозяйства СССР.

Журнал «Электричество» уделяет особое внимание освещению актуальных теоретических исследований и вопросов практического применения новой техники на производстве. В журнале регулярно ведется раздел «Из опыта работы» и печатаются обзоры, рассчитанные на молодых инженеров и научных работников. Журнал дает научно-техническую консультацию по запросам читателей.

Журнал «Электричество» систематически освещает вопросы истории отечественной электротехники, информирует читателей в реферах и обзорах о важнейших материалах отечественной и иностранной электротехнической периодики, сообщает о решениях технических управлений МЭС и МЭП и о выпуске заводами электропромышленности новых изделий и материалов.

В журнале регулярно проводятся научно-технические дискуссии.

**12 номеров в год  
(144 печ. листа)**

**Подписная цена  
на 6 мес. 48 руб.  
на 12 " 96 "**

**Подписка на журнал „ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“ принимается  
во всех отделениях Союзпечати, во всех конторах,  
отделениях и агентствах связи, а также уполномочен-  
ными по подписке на предприятиях, в институтах  
и в учреждениях.**

Цена 8 руб.

**ГОСЭНЕРГОИЗДАТ**

**ПРОДОЛЖАЕТСЯ ПОДПИСКА**

**на II полугодие 1954 г.**

**НА ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ**

**ЭЛЕКТРИЧЕСТВО**

**ОРГАН АКАДЕМИИ НАУК СССР,  
МИНИСТЕРСТВА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ СССР  
И МИНИСТЕРСТВА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР**

*(Основан в 1880 г.)*

Журнал рассчитан на широкие круги инженеров и научных работников, ведущих работу в различных областях электротехники, и ставит своей задачей помогать им в разработке и решении важнейших практических и теоретических вопросов, возникающих в работе по электрификации всех отраслей народного хозяйства СССР.

Журнал «Электричество» уделяет особое внимание освещению актуальных теоретических исследований и вопросов практического применения новой техники на производстве. В журнале регулярно ведется раздел «Из опыта работы» и печатаются обзоры, рассчитанные на молодых инженеров и научных работников. Журнал дает научно-техническую консультацию по запросам читателей.

Журнал «Электричество» систематически освещает вопросы истории отечественной электротехники, информирует читателей в реферах и обзорах о важнейших материалах отечественной и иностранной электротехнической периодики, сообщает о решениях технических управлений МЭС и МЭП и о выпуске заводами электропромышленности новых изделий и материалов.

В журнале регулярно проводятся научно-технические дискуссии.

---

**12 номеров в год  
(144 печ. листа)**

**Подписная цена  
на 6 мес. 48 руб.  
на 12 " 96 "**

---

**Подписка на журнал „ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“ принимается  
во всех отделениях Союзпечати, во всех конторах,  
отделениях и агентствах связи, а также уполномочен-  
ными по подписке на предприятиях, в институтах  
и в учреждениях.**