

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

12

1937

ОБЪЕДИНЕН<sup>Т</sup> НОЕ НАУЧНО-  
ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО



Фрунзенская областная универсальная научная библиотека

[www.booksite.ru](http://www.booksite.ru)

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

12

1937  
июнь

ГОД ИЗДАНИЯ 58-й

ГААН ГЛАВЭНЕРГОПРОМА, ГЛАВЭНЕРГО НКТП И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА АКАДЕМИИ НАУК СССР

Адрес редакции: Москва, Бол. Калужская, дом 67. Энергетический ин-т, 1 этаж, комн. 144, телефон. В 5-32-79

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

## СОДЕРЖАНИЕ

Толвинский В. А. — Электропередача Куйбышев — Москва как инженерная проблема . . . . .	1
Соколов А. А. — Кислородно-цеевые фотоэлементы . . . . .	11
Суслов М. П. — Автоматическая асинхронная гидроэлектростанция Дроп-Плен (США) . . . . .	22
Акодис М. М. — Трубчатые разрядники для защиты от грозовых аварий . . . . .	25
Меркин Г. Б. — Конденсаторные электродвигатели . . . . .	34
Станиславский Б. И. — Основы теории конденсаторного электродвигателя . . . . .	39
Булаев Н. М. — Питание однофазным током трехфазного асинхронного электродвигателя конденсатором . . . . .	44
Михайлов В. И. — Электрификация Японии . . . . .	48
На обложке — акад. О. Ю. Шмидт, начальник героической экспедиции СССР на Северный полюс	

## К ОБСУЖДЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ III ПЯТИЛЕТКИ

### Электропередача Куйбышев — Москва как инженерная проблема

PROBLEM OF A LONG-DISTANCE POWER TRANSMISSION IN CONNECTION WITH  
MOSCOW-KUIBISHEV HIGH-VOLTAGE TRANSMISSION SCHEME

В. А. Толвинский  
Ленинград

ПРОБЛЕМА передачи больших мощностей на большие расстояния уже несколько лет занимает внимание широких кругов электриков Союза и стоит в порядке дня исследовательских институтов. Однако до недавнего времени проблема рассматривалась лишь в плоскости общих вопросов в связи с созданием в будущем единой высоковольтной сети Союза. Конкретно в виде инженерной задачи проблема передачи больших мощностей на большие расстояния впервые стала в прошлом году перед проектной организацией, разрабатывавшей узел гидротехнических сооружений в районе г. Куйбышева (Куйбышевское управление Гидроэнергопроекта).

По эскизному проекту указанной организации предполагается соорудить на так называемой Самарской Луке реки Волги у Царева Кургана плотину с двумя русловыми гидростанциями — правобережной с 8 агрегатами по 100 MW и левобережной с 6 такими же агрегатами; кроме того

предполагается прорыть к Переволокам деривационный канал и создать в Переволоках еще одну гидростанцию с 11 агрегатами той же мощности, т. е. по 100 MW. Суммарная мощность трех намечаемых гидростанций составит, таким образом, 2500 MW, а годовая выработка энергии — 15 млрд. kWh.

С момента начала работ по Куйбышевскому гидроузлу до пуска первых агрегатов русловых гидростанций потребуется не менее 5 лет; для завершения же всех работ — еще около 2 лет. Очевидно, что ныне, когда проект еще не получил утверждения, трудно говорить вполне уверенно о том, как по сооружении куйбышевских гидростанций будут использоваться их мощность и энергия. Но, выдвинув проект использования энергии Куйбышевского гидроузла, совершенно необходимо теперь же рассмотреть возможные варианты распределения этой энергии, тем более, что уже сейчас совершенно ясно, что вся колос-

сальная выработка куйбышевских гидростанций не может быть использована на месте и в ближайшем районе. При рассмотрении же возможных вариантов использования энергии куйбышевских гидростанций, естественно, выплывает вопрос о передаче ее в Центральный промышленный район и на Урал, при этом по намечаемой к передаче мощности и по протяженности трассы передача в Центральный промышленный район должна представить наибольшие трудности. Ввиду этого Куйбышевское управление Гидроэнергопроекта сочло необходимым рассмотреть прежде всего вопрос об устойчивости передачи 1000 MW из Куйбышева в Москву на расстояние около 900 km. Как само собой понятное считалось, что в данном случае речь может идти только о напряжении 380 KV.

Суммарная мощность московской энергосистемы была принята при этом равной 3400 MW, а мощность генераторов куйбышевских гидростанций — 1300 MW (были учтены лишь две русловые гидростанции).

Устойчивость передачи Куйбышев — Москва при 380 KV. Исследование этого вопроса Куйбышевское управление Гидроэнергопроекта поручило Всесоюзному электротехническому институту (ВЭИ).

Результаты работы ВЭИ изложены в статье С. П. Жданова, напечатанной в журнале «Электричество» за 1936 г., № 13, стр. 5. В начале статьи автор ставит задачу следующим образом: «При величине передаваемой мощности 1000 MW и длине линии передачи 900 km система не обладает естественной статической устойчивостью, и, следовательно, нормальная работа системы невозможна без применения специальных мероприятий для повышения устойчивости. Из числа известных мероприятий единственным реальным средством, обеспечивающим устойчивость очень длинных систем передачи, является применение промежуточных синхронных компенсаторов (схема Баума). Эта схема и была положена в основу расчета».

Выводы проделанной работы С. П. Жданов формулировал следующим образом:

«Резюмируя полученные результаты, можно констатировать, что достаточно высокий уровень устойчивости такой системы передачи, как Куйбышев — Москва, может быть достигнут лишь ценою очень значительной мощности промежуточных компенсаторов. Минимальная мощность компенсаторов, помимо установленных у приемника<sup>1</sup>, в лучшем варианте — 3 цепи и 3 подстанции — достигает 2500 MVA (или 2,5 MVA на передаваемый мегаватт). Большая мощность промежуточных компенсаторов влечет за собой значительное увеличение как первоначальных затрат, так и потерь. В связи с этим весьма желательным является изыскание способов повышения эффективности промежуточных компенсаторов в отношении статической устойчивости системы. Задача эта представляется довольно трудной, однако возможность успешного разрешения ее, безусловно, не исключена».

В качестве одной из мер, идущих в этом направлении, в упомянутой статье С. П. Жданов, а затем в статье И. С. Брук, помещенной в том же номере журнала «Электричество», предлагаются серийная компенсация линии с использованием асинхронных компенсаторов. Применение последних позволило бы по мнению цитируемых авторов снизить величину потребной компенсационной мощности до 1,85 MVA на передаваемый мегаватт. Однако, как справедливо указывается в передовой статье в том же номере журнала «Электричество», «даже в этом случае экономичность такой передачи остается под вопросом. И хотя проблема построения трансформаторов на напряжение в 380 KV является, как это видно из статьи проф. Петрова<sup>2</sup>, вполне разрешимой, все же окончательное разрешение вопроса о технико-экономической целесообразности такой связи систем потребует еще значительных усилий от нашей исследовательско-расчетной и изобретательской мысли».

Если к этому прибавить, что потери в линии передач Куйбышев — Москва определились по расчетам ВЭИ (без учета потерь в компенсаторах) в 16% и учесть, что для составления реальной сметы на сооружение передачи при 380 KV нет никаких данных, так как это напряжение еще нигде не осуществлено, то станет совершенно очевидным, что вопрос о сооружении передачи Куйбышев — Москва из цикла реальных инженерных задач ближайшего времени переводится в разряд проблем с неопределенным сроком возможности осуществления.

Такой результат отодвигал на неопределенный срок и идею использования энергии Куйбышевского гидроузла, поскольку на месте эта энергия не может быть использована в полном объеме.

Предложение составить вариант передачи при напряжении 300 KV. На этой стадии работ Куйбышевского управления Гидроэнергопроекта электротехническая часть Ленинградского отделения Гидроэнергопроекта (в дальнейшем сокращенно э. ч. Ленгидэпа) выступила с предложением составить инженерный эскизный проект линий передачи и подстанций Куйбышевского гидроузла при напряжении 300 KV.

Делая такое предложение, э. ч. Ленгидэпа исходила из следующих трех соображений.

1. Наивысшее напряжение имеется в настоящем время на линии передачи Boulder-Dam — Los Angeles в США, а именно: на приемном конце линии 275 KV, на отправном 287 KV с возможностью поднять его в аварийных режимах до 303 KV. Таким образом практически освоенным можно считать напряжение 300 KV, причем опубликованные в американской литературе данные об этой передаче позволяют составить инженерный эскизный проект на это напряжение и для линии передачи Куйбышев — Москва. Что же касается более высокого напряжения порядка 400 KV, то (так как оно нигде не осуществлено) в данный момент составление реального инженерного проекта и сметы на передачу энергии Куйбышев — Москва при напряжении 400 KV невозможно.

2. Подходя к передаче энергии из Куйбышева

<sup>1</sup> Мощность этих компенсаторов получилась равной 800 MVA.

в Москву как к инженерной задаче, нужно идти таким путем, каким шли в США, когда возникла идея использования для Los Angeles энергии р. Колорадо. Как известно, там первоначально был составлен проект передачи энергии при наибольшем достигнутом в то время напряжении 220 кВ. Проект дал удовлетворительный экономический результат, но вместе с тем показал, что если бы удалось применить более высокое напряжение, то экономический эффект был бы выше. Дальнейшая работа над проектом показала, что оптимальное решение получается при указанных выше напряжениях на приемном и отправном концах, требующих создания трансформаторов и аппаратуры на 300 кВ. Поэтому решено было приступить к работе над осуществлением 300-кВ оборудования, к чему были привлечены передовые американские фирмы и ряд исследовательских институтов. Эта работа потребовала для своего осуществления около 5 лет упорного труда.

Выступая с предложением составить инженерный проект линии передачи Куйбышев — Москва при 300 кВ, э. ч. Ленгидэпа подчеркивала, что в случае положительного экономического результата такой проектировки проблема использования энергии Куйбышевского гидроузла сразу получила бы твердую базу, а тогда дальнейшая работа над проектом при более высоких, еще нигде не осуществленных напряжениях будет иметь целью, как и в случае Boulder-Dam — Los Angeles, улучшение экономических показателей, не подвергая сомнению возможность осуществить намечаемое использование энергии Куйбышевского гидроузла.

По этой причине э. ч. Ленгидэпа не только не отвергала необходимости работать над применением для передачи Куйбышев — Москва 400 кВ, но взялась произвести в том объеме, в каком это ныне возможно, соответствующие расчеты и составить ориентировочную оценку того эффекта, которого можно ожидать при переходе на 400 кВ, подчеркивая, однако, что в этой части работа не может иметь характера реального инженерного проекта в силу сомнительности целого ряда положений, которыми приходится задаваться при рассмотрении еще нигде не осуществленного напряжения.

3. То обстоятельство, что даже при применении напряжения 380 кВ передача энергии из Куйбышева в Москву согласно проделанной ВЭИ работе требует для обеспечения устойчивости исключительных капитальных затрат ведет к большим потерям и эксплоатационным расходам, нельзя считать решающим. Как известно, накопление количественных изменений ведет к существенным качественным различиям, что не было учтено в работе ВЭИ, который при рассмотрении задачи о передаче энергии из Куйбышева в Москву исходил из тех требований, которые предъявляются к ныне осуществляемым электропередачам.

Эти требования касаются прежде всего бесперебойности в подаче энергии. Сооружение таких линий передачи, которые полностью удовлетворяли бы этому требованию при всех возможных авариях на линиях, — в том числе и при наиболее тяжелых, как-то: трехполюсных коротких замыканиях, вблизи генераторной станции, — ведет

к экономически неприемлемым показателям. По счастью, однако, как показывает статистика эксплуатации американских линий электропередачи, трехполюсное короткое замыкание на линии передачи бывает очень редко. Так, по американским данным 69% аварий на линиях передачи являются однополюсными короткими замыканиями на землю, 25% — двухполюсными и 6% — трехполюсными. Следует, кроме того, отметить, что преобладающая часть двух- и трехполюсных коротких замыканий возникает в результате развития однополюсного замыкания, причем по мере усовершенствования выключателей и защитной аппаратуры в направлении сокращения времени отключения поврежденного участка линии передачи число двух- и трехполюсных коротких замыканий в процентном отношении уменьшается.

На основе этих статистических данных при сооружении менее ответственных электропередач ныне удовлетворяются достижением бесперебойности подачи энергии при однополюсных коротких замыканиях на землю. В более ответственных случаях идут на обеспечение бесперебойности не только при однополюсном, но и при двухполюсном коротком замыкании на землю. На линии передачи Boulder-Dam — Los Angeles длиной 430 км, для достижения этой цели пришлось пойти на секционирование двухцепной линии передачи посредством масляных выключателей на три участка, при котором в случае аварии выпадает из работы лишь одна треть одной из двух цепей. Это мероприятие позволило существенно повысить величину бесперебойно передаваемой мощности.

Если этот принцип применить к линии передачи Куйбышев — Москва, то здесь при расстоянии, в два раза большем, одного секционирования линии передачи недостаточно, необходимо прибегнуть к установке синхронных компенсаторов в точках секционирования, а это, как показали расчеты ВЭИ, ведет к непомерному увеличению капитальных затрат, потерь и эксплоатационных расходов.

Но спрашивается, обязательно ли предъявлять к линии передачи Куйбышев — Москва такие же требования, какие были предъявлены к линии передачи Boulder-Dam — Los Angeles? Анализ конкретных условий приводит к выводу, что в случае передачи Куйбышев — Москва имеются все основания для решения проблемы передачи по совершенно иному принципу.

Действительно, к моменту, когда передача Куйбышев — Москва вступит в работу в полном объеме, мощность электрических станций московской энергосистемы будет порядка 3500 MW. Реально изобразить будущую конфигурацию основных сетей и генерирующих точек этой системы в данный момент, конечно, невозможно, однако некоторые достоверные предположения сделать можно. Во-первых, есть основание предполагать, что ради уменьшения разрывных мощностей выключателей и ради более легкой ликвидации аварий система будет секционирована на ряд районов, связанных через определенные реактивности. Ориентировочно число районов можно принять равным 4—5 и мыслить, что связь между ними осуществляется через особые транс-

форматоры связи 220-кВ кольца или полукольца, охватывающего Москву на расстоянии около 50 км от центра. Во-вторых, система мощностью 3500 MW не может обеспечить нормального электроснабжения, если в ней не будет вращающегося резерва, по мощности не меньшего мощности наиболее крупного генератора системы. Думается поэтому, что если к моменту готовности передачи Куйбышев — Москва вращающийся резерв московской системы принять равным 5%, т. е. 175 MW, то это отнюдь не может считаться завышением.

Если же такой вращающийся резерв в московской энергосистеме действительно будет, то тогда он, очевидно, может явиться резервом и для подходящих к московской энергосистеме линий передачи при условии, что каждая цепь этой передачи будет нести нагрузку не более 175 MW. Учет же этого обстоятельства открывает новые возможности для линии передачи Куйбышев — Москва и позволяет рассчитывать на осуществимость ее при 300 kV.

В самом деле при передаче энергии из Куйбышева в Москву по схеме, принятой в расчетах ВЭИ, предел передаваемой мощности при достижимых ныне временах отключения поврежденного участка линии определяется условием динамической устойчивости при двухполюсном коротком на землю вблизи Куйбышева. Если же в расчете на внутренний вращающийся резерв московской энергосистемы пойти на осуществление передачи по нижеизложенной блоковой схеме:

генератор Куйбышевской гидростанции, соответствующий повышающий трансформатор, одна цепь линии передачи, понижающий трансформатор,

то тогда предел мощности, передаваемой по одной цепи линии передачи будет ограничиваться при выбранном напряжении передачи условиями статической устойчивости этой передачи и условиями динамической устойчивости при коротких замыканиях в московской энергосистеме, а не на самой линии передачи; это кардинально меняет в благоприятную сторону предел передаваемой мощности и позволяет надеяться на возможность применения 300 kV.

Предложение э. ч. Ленгидэпа составить эскизный проект передачи энергии из Куйбышева в Москву при 300 kV первоначально не встретило сочувствия у Куйбышевского управления, которое считало, что дальнейшую разработку нужно вести при 400 kV. Но так как предложение э. ч. Ленгидэпа содержало (с вышеупомянутыми оговорками) и вариант на 400 kV, то Куйбышевское управление согласилось в конце концов на то, чтобы указанная передача разрабатывалась в двух вариантах — на 300 и 400 kV.

Естественно, что приступив к выполнению полученного задания, э. ч. Ленгидэпа занялась прежде всего 300-кВ вариантом по блоковой схеме передачи.

Выбор мощности, передаваемой по одной 300-кВ цепи. Приведенные выше соображения о резервных возможностях московской энергетической системы заставляют с точки зрения осуществления блоковой передачи не ити с переда-

ваемой мощностью на одну цепь выше 175 MW, с другой стороны, грубая прикидка стоимости передачи на цепь показала, что при ожидаемом числе часов использования передача при 300 kV может оказаться приемлемой экономичности, если передаваемая мощность будет не менее 150 MW на цепь, что составляет около  $\frac{2}{3}$  натуральной мощности одной 300-кВ цепи. На основании этих соображений за исходную величину была принята мощность в 150 MW на приемном конце. Что касается расстояния от Куйбышева до Москвы, то при первых, предварительных расчетах оно было принято таким же, как и в расчетах ВЭИ, т. е. равным 900 км. Позднее при уточнении трассы линии передачи и географического расположения куйбышевских гидростанций, это расстояние определилось в 850 км. Оно и было принято в окончательных расчетах.

**Выбор проводов, тросов и опор.** Следующим этапом в проектировании был выбор сечения провода линии передачи и его конструкции, а также типа опор и габаритных расстояний на опоре, что было существенно как с точки зрения определения параметров для электрического расчета линии передачи, так и для установления заданий для проектирования опор.

Проверочные расчеты на корону при наиболее неблагоприятных атмосферных условиях показали, что диаметр провода может быть взят равным 36 мм, т. е. таким же, как и на линии Boulder-Dam — Los Angeles, хотя на последней среднее эксплуатационное напряжение несколько ниже, чем на проектируемой линии Куйбышев — Москва.

Из возможных вариантов конструкции проводов был выбран провод сталь-алюминиевый обычной свивки. Площадь сечения алюминия 600 mm<sup>2</sup> (эквивалентно 360 mm<sup>2</sup> меди) была выбрана с таким расчетом, чтобы, не нарушая при выбранном внешнем диаметре провода допустимых соотношений между сечением алюминия и стали, получить возможно меньшие потери в линии передачи. Как предел для суммарных потерь в линии передачи и концевых трансформаторах было принято 10%.

Вес погонного метра указанного провода получился равным 2930 kg.

В качестве основного типа опор <sup>3</sup> была выбрана одноцепная опора с горизонтальным расположением проводов и с 2 тросами, подвешенными с защитным углом в 30°. Высота подвески тросов на опоре над плоскостью подвески проводов получилась равной 8 м, в середине пролета расстояние между тросами и проводами на 1,5 м больше.

Тросы предположены стальные диаметром 12,85 mm, площадь сечения 95 mm<sup>2</sup>.

Наименьшее расстояние проводов от земли в середине пролета принято равным 8 м. Это расстояние получено логическим продолжением принятой в Союзе шкалы габаритных расстояний до земли для напряжений до 220 kV.

Расстояние между проводами на опоре было определено из условия допустимого приближения

<sup>3</sup> Опоры проектировались А. Л. Хобергом, М. М. Либным и К. С. Синелобовым при консультации Н. П. Виноградова.

проводов к телу опоры при коммутационных (4-кратных) перенапряжениях. Это расстояние получилось равным (с округлением) 10 м.

Из нескольких выполненных вариантов промежуточной опоры была выбрана опора портального типа с одним дополнительным ригелем. Вес промежуточной опоры при экономическом профиле в 400 т получился равным 9700 kg, вес анкерной — 12 000 kg. Объем фундаментов соответственно — 20,9 и 43,6 м<sup>3</sup>.

**Выбор изоляции линий передачи на 300 kV.** На линии передачи Boulder-Dam — Los Angeles, имеющей максимальное линейное напряжение 303 kV, разрядное расстояние по подвесной гирлянде равно 2960 mm при применении изготовленных в Союзе подвесных изоляторов типа П-4,5 размерами 170 mm (высота) на 280 mm (диаметр тарелки); необходимо для найденного расчетами максимального напряжения на линии передачи (см. ниже) в 324 kV взять подвесную гирлянду из 19 элементов. К этому же результату приводит расчет изоляции на 4-кратные коммутационные перенапряжения и расчет на грозовые перенапряжения при токе в столбе молнии порядка 150 kA и при условии подвески защитных тросов и осуществления заземления опор с сопротивлением порядка 5 Ω.

На анкерных опорах предположены сдвоенные гирлянды из натяжных элементов типа П-7 по 18 элементов в каждой гирлянде.

Ныне изготовленные в Союзе изоляторы П-4,5 и П-7 не удовлетворяют требованиям, выдвигаемым механическим расчетом 300-kV линии передачи, но при доведении характеристик изоляторов до уровня, уже достигнутого за границей, эти требования будут перекрыты. Арматура изоляторов принята аналогичной изготовленной Армсетью для 220-kV линий передачи с увеличением диаметра защитного кольца до 1 м. В дальнейшей стадии проектирования выбору арматуры придется уделить серьезное внимание, так как арматура Армсети, как показали испытания, проведенные в лаборатории им. А. А. Смуррова в Ленинграде, не вполне удовлетворительна. На дальнейших стадиях проектирования нужно будет уделить надлежащее внимание и изоляторам, так как имеются основания предполагать, что переход на большее число более мелких изоляторов (при сохранении требуемой механической прочности) может дать лучшие условия с точки зрения предупреждения каскадирования по гирлянде.

#### Электрические параметры 300 = kV линии передачи

Активное сопротивление при 20° С 0,0493 Ω/km  
Индуктивное сопротивление . . 0,415 Ω/km  
Емкостная проводимость . . . . . 10<sup>-6</sup> × 2,664 S/km

Активное сопротивление было определено с учетом свивки провода (2%), но без учета скин-эффекта и без учета стальной сердцевины. Можно считать, что неучет стальной сердцевины сечением 160 mm<sup>2</sup> уравновешивает пренебрежение скин-эффектом.

При определении коэффициента самоиндукции и при определении емкости сделано пренебрежение

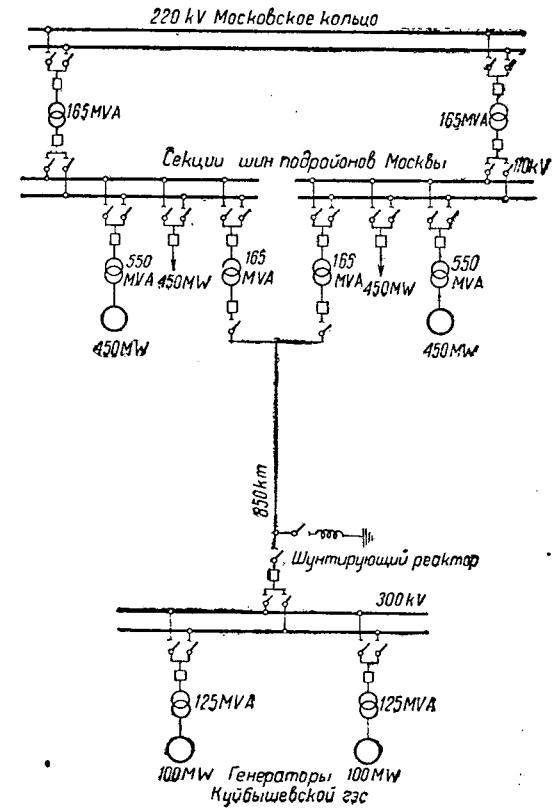


Рис. 1

влиянием соседних цепей, проложенных на самостоятельных опорах, и влиянием заземляющих тросов. Активная составляющая проводимости также не учитывалась.

**Выбор схемы отправного и приемного конца линии передачи.** Схема запроектированной боковой передачи энергии из Куйбышева в Москву показана на рис. 1. Так как мощность одного генератора куйбышевских гидростанций принята равной 100 MW, то при задании передать по одной цепи 150 MW приходится брать на каждую цепь два гидрогенератора. При этом, однако, нужно иметь в виду, что в моменты, когда будет передаваться наибольшая мощность в Москву (декабрь), агрегаты Куйбышевской гидростанции будут работать при пониженном напоре и смогут отдавать не по 100, а лишь по 90 MW, т. е. в сумме два генератора смогут дать 180 MW. Так как окончательные расчеты показали (см. ниже), что передаваемая в Москву на одной цепи мощность может быть повышена до 160 MW, а потери будут составлять при этом около 15,5 MW, то нагрузка работающих на такую цепь двух генераторов составит при этих условиях 175,5 MW, т. е. 97,5% от располагаемой мощности (180 MW).

Каждый из двух гидрогенераторов, работающих в блоке с одной цепью линии передачи на Москву, включается на линию через свой повышающий трансформатор, причем предусмотрена двойная система шин. Масляный выключатель предусмотрен лишь на стороне высшего напряжения трансформатора.

Как указывалось выше, каждая 300-kV цепь линии передачи Куйбышев — Москва должна работать на секцию Москвы мощностью примерно в 900 MW. Однако создание секции такой мощно-

сти и вливание в нее по линии передачи 160 MW вызывает сомнение в отношении выключателей на стороне 110 kV. При детальной разработке схемы приемного конца придется, вероятно, разбить секцию на несколько подсекций, ориентируясь на предельные допустимые разрывные мощности выключателей на 110 kV. В настоящей стадии эскизного проектирования предусмотрено деление секции только на две части, с удвоением потребной мощности автотрансформаторов 300/110 kV на приемном конце. Таким образом указанные на схеме (рис. 1) генераторы подсекции московской энергосистемы мощностью по 450 MW являются условными в вышеуказанном смысле.

Мощность каждого из автотрансформаторов приемного конца линии передачи принята равной 165 MVA. Нормальным режимом является работа на две подсекции, но при расчетах устойчивости принимался во внимание как более тяжелый режим работы на одну подсекцию.

Особенностью схемы, выбранной для передачи энергии, является применение на отправном конце постоянно включенного реактора мощностью в 115 MVA. О назначении и выборе его сказано ниже.

**Выбор гидрогенераторов.** Мощность отдельного гидрогенератора была указана выше: 100 MW. Скорость вращения при применении турбины Френсиса будет по данным Ленинградского металлического завода 75 об/мин, а при турбине Каплана — 83,3 об/мин. Напряжение в соответствии с напряжением, принятым в Союзе для турбогенераторов мощностью в 100 MW, следует взять равным 15 750 V.

При включении на 300-kV линии гидрогенераторы будут работать вследствие большой емкости линии при коэффициенте мощности, очень близком к единице. По этой причине эти генераторы можно было бы заказывать с  $\cos \varphi = 1$ , как это было сделано на Boulder-Dam. Однако такой выбор был бы неправильным. Дело в том, что от куйбышевских гидростанций будут отходить не только линии передачи на 300 kV, но и линии более низкого напряжения для питания менее отдаленных потребителей. Нормально генераторы, работающие на такие линии передачи, выбираются с коэффициентом мощности 0,8. Так как в дальнейшем при эксплоатации куйбышевских гидростанций соотношение между числом генераторов, работающих на 300-kV линии, и числом генераторов, работающих на линии более низкого напряжения, может измениться, и так как по эксплоатационным условиям желательно иметь однотипные генераторы для возможности заменять одни генераторы другими, то при проектировании куйбышевских гидростанций желательно сделать все генераторы одинаковыми. Отсюда вытекает, что все генераторы следует взять с  $\cos \varphi = 0,8$ , т. е. их номинальная мощность должна равняться 125 MVA при  $\cos \varphi = 0,8$ .

Применение этих генераторов при передаче мощности из Куйбышева в Москву при  $\cos \varphi = 1,0$  даст эффект уменьшения на 25% синхронной реактивности, отнесенной к передаваемой мощности. Это обстоятельство является положительным, так как с целью увеличения передаваемой мощности синхронную реактивность и связанные

с ней другие реактивности желательно иметь возможно малыми.

Синхронные реактивности обычных гидрогенераторов (если не предъявляется особых требований), огненесенные к собственной мощности гидрогенераторов в kVA и выраженные в долях единицы обычно близки к 1,0 и не зависят от мощности гидрогенератора. Отсюда следует, что уменьшения синхронной реактивности, отнесенной к отдаваемой в линию мощности, можно добиться двумя путями: применением генераторов обычной конструкции с обычной реактивностью порядка 1,0, отнесенной к собственной мощности гидрогенератора, но имеющих номинальную мощность большую отдаваемой в линию передачи; вторых, конструированием для данной линии передачи гидрогенераторов на величину передаваемой мощности, но имеющих специальную конструкцию, которая дает пониженное значение синхронной реактивности, отнесенной к собственной мощности гидрогенератора. Как следует из теории синхронных машин, уменьшение синхронной реактивности достигается, главным образом за счет уменьшения числа витков обмотки статора и увеличения междужелезного пространства. И то и другое требует увеличения количества меди на роторе и связано почти всегда с увеличением диаметра и длины машины.

На установке Boulder-Dam с целью уменьшения реактивностей пошли по второму пути. Примененные там гидрогенераторы имеют синхронную реактивность, отнесенную к собственной мощности гидрогенератора, порядка 0,5, вследствие чего габаритные размеры генераторов, имеющих номинальную мощность 82,5 MVA при  $\cos \varphi = 1,0$ , соответствуют габаритным размерам обычных гидрогенераторов мощностью в 125 MVA при  $\cos \varphi = 1,0$ , т. е. в 1,51 раза больше.

Для установления того снижения синхронной реактивности, на которое можно идти при выборке технических условий на гидрогенераторы куйбышевских гидростанций без опасения создать затруднения при их изготовлении, следует ориентироваться на те гидрогенераторы, которые изготавливались в Союзе на заводе «Электросила». Из данных, опубликованных заводом в техническом справочнике «Гидрогенераторы» (1935 г.), наименьшее значение синхронной реактивности имеют гидрогенераторы Нижнеискирской гидростанции. Поэтому в проекте предположено, что гидрогенераторы куйбышевских гидростанций мощностью по 125 MVA при  $\cos \varphi = 0,8$  будут иметь такие же реактивности, как и генераторы Нижнеискирской гидростанции, а именно (в долях единицы):

Проточная синхронная реактивность . . . . . = 0,76  
Поперечная синхронная реактивность . . . . . = 0,48  
Продольная переходная реактивность . . . . . = 0,26

Следует остановиться еще на выборе постоянной инерции.

Приведенные расчеты показали, что в условиях работы куйбышевских гидростанций можно ограничиться постоянной инерцией в 7 sec — обычной для гидрогенераторов, изготавляемых в Союзе.

*Выбор повышающих трансформаторов отпр.ного конца 300-kV линии передачи. Мощно. повышающего трансформатора должна соотв.*

твовать мощности сочленяемого с ним генератора. Трансформаторы предположены групповые мощностью на фазу в 42 MVA. Осуществимость таких трансформаторов не может вызывать сомнения, так как для гидростанции Boulder-Dam были сконструированы трансформаторы того же напряжения мощностью на фазу в 55 MVA. Реактивность последних равняется 10,73%, что позволяет принять для трансформаторов куйбышевских гидростанций реактивность в 11%.

Трансформаторы желательно взять нерезонирующего типа с заземлением нейтрали через импедор. Охлаждение — посредством принудительной циркуляции масла через водяной охладитель, система, обычно применяемая на крупных гидростанциях.

**Выбор автотрансформаторов приемного конца линии передачи.** Для уменьшения реактивности передачи с целью увеличения устойчиво передаваемой мощности на приемном конце линии передачи предусмотрены не трансформаторы, а автотрансформаторы напряжением 300/110 kV, мощностью по 165 MVA в группе, т. е. по 55 MVA на фазу. Если исходить из реактивности в 14%, нормальной для трансформатора такой мощности, то эквивалентный ему по мощности автотрансформатор должен иметь реактивность около 8,8% без принятия каких-либо специальных мероприятий по снижению реактивности. Эта величина реактивности и принята в проекте.

Недостатками автотрансформатора являются необходимость глухого заземления нейтрали и возможность перехода перенапряжений со стороны обмотки высшего напряжения на обмотку низшего напряжения. Вследствие этого при выполнении окончательного проекта линии передачи может оказаться целесообразным заменить автотрансформаторы трансформаторами. В этом случае для удержания принятой реактивности придется пойти на ряд специальных конструктивных мер.

Охлаждение автотрансформаторов принято воздушное посредством вентиляторов (дутьевое).

**Эффект, производимый емкостью 300-kV линии передачи и мероприятия по его компенсации.** При сведении линии передачи к П-образной схеме емкость 300-kV линии длиной 850 km и с приведенными выше постоянными эквивалентна двум конденсаторам по концам мощностью каждый (с округлением) в 115 MVA.

Конденсатор отправного конца линии передачи, перегружая емкостным током генераторы, включенные на линию, заставляет их работать как в нормальном режиме, так, в особенности, при пониженной нагрузке со значительно уменьшенным возбуждением, что ведет к понижению предела мощности, надежно передаваемой по линии.

Работа, выполненная А. А. Вульфом, при исследовании линий передачи на 100 Hz<sup>4</sup>, показала эффективность применения с целью уменьшения эффекта, вызываемого емкостью, шунтирующего реактора на отправном конце линии передачи. Такой реактор предусмотрен поэтому и в 300-kV схеме передачи Куйбышев — Москва. Мощность

его выбрана из условия полной компенсации емкостного эффекта на отправном конце линии, т. е. равной 115 MVA. Реактор предположен с постоянной реактивностью и постоянно приключенным к линии передачи на напряжении 300 kV.

При холостом ходе линии и питании ее со стороны Москвы такой реактор полностью парализует эффект Ферранти, давая почти равные напряжения на обоих концах линии передачи. Этим обеспечивается возможность синхронизации куйбышевских гидрогенераторов с Москвой при подаче напряжения из Москвы.

Наличие на куйбышевском конце линии передачи шунтирующего реактора обеспечивает также возможность возбуждать линию со стороны Куйбышева путем поднятия напряжения на куйбышевских гидрогенераторах. При этом, как показал расчет, для получения 300 kV на приемном конце в Москве гидрогенераторы куйбышевских гидростанций должны быть возбуждены до 51% своего номинального напряжения, что делает режим холостого хода вполне устойчивым.

Емкость приемного конца линии передачи производит на московскую энергосистему благоприятное влияние, так как играет роль компенсатора мощностью в 115 MVA, т. е. улучшает коэффициент мощности московских генераторов. Считая, что секция московской энергосистемы, к которой приключена цепь линии передачи Куйбышев — Москва, нагружена на 800 MW при  $\cos \varphi = 0,85$ , мы получим, что генераторы этой секции, работая без линии передачи, должны давать около 400 MVA отстающей реактивной мощности. Наличие линии Куйбышев — Москва, некомпенсированной на приемном конце, уменьшит при холостом ходе линии эту цифру на 115 MVA; при полной же нагрузке линии передачи московские генераторы будут практически работать при том же  $\cos \varphi = 0,85$ , как и в случае отсутствия куйбышевской линии передачи, так как упреждающая реактивная мощность приемного конца линии передачи<sup>5</sup> будет израсходована на компенсацию падения напряжения, вызываемого в линии током нагрузки.

Таким образом, оставляя московский конец линии передачи некомпенсированным, можно обойтись без синхронных компенсаторов в Москве, возложив задачу регулирования напряжения на этом конце на московские генераторы.

Применение на приемном конце линии передачи такого же реактора, как на отправном, имело бы с точки зрения режимов работы самой линии, как то будет пояснено ниже, положительное значение, но тогда для регулирования напряжения на приемном конце пришлось бы установить в Москве синхронные компенсаторы, мощность которых была бы порядка 0,8 от мощности, передаваемой из Куйбышева в Москву, а это весьма существенно сказалось бы на стоимости передаваемого по линии киловаттчаса.

Отказ от установки реактора на московском конце линии создает опасность повышения напряжения на этом конце при его случайном отключении.

<sup>4</sup> Работа выполнялась по заданию соответствующей комиссии при Совете Труда и Обороны.

<sup>5</sup> При принятых условиях для электрического расчета линии передачи, см. § 13.

чении. В момент такого отключения появляется на этом конце перенапряжение рабочей частоты (эффект Ферранти). Как показал расчет, в первый момент после отключения, пока основной магнитный поток гидрогенераторов куйбышевских гидростанций не успел еще измениться, это повышение в предположении, что на линии нет никакой нагрузки, достигает на московском конце 712 кВ между проводами. Однако такое напряжение практически не может возникнуть, так как вследствие образования короны гидрогенераторы получат значительную нагрузку, что повлечет за собой снижение напряжения.

Действительно, критическое напряжение проводов, выбранных для 300-кВ передачи, составляет при стандартных атмосферных условиях 360 кВ, а при наименьшей возможной температуре наружного воздуха в  $-40^{\circ}$  и наивысшем атмосферном давлении в 790 мм ртутного столба 440 кВ.

Произведенные расчеты показали, что если критическое напряжение равно 440 кВ, то потери на корону дают нагрузку на генераторы порядка 250 МВт, причем напряжение на их зажимах возрастает на 27%, а на холостом конце 300-кВ линии достигает 606 кВ. При критическом напряжении в 360 кВ нагрузка генераторов достигает 290 МВт, а напряжение возрастает на 16%, напряжение же холостого конца линии достигает 510 кВ.

Эти перенапряжения будут иметь место при отключении на стороне высшего напряжения приемных автотрансформаторов, а следовательно, могут быть опасными только для изоляторов линии и втулок масляного выключателя. При отключении на низшей стороне автотрансформатора намагничивающий ток его несколько снизит перенапряжение, но зато этому перенапряжению подвергнется и сам автотрансформатор.

На основании этих расчетов можно притти к заключению, что напряжение на приемном конце в первый момент после отключения линии не может быть больше двойного номинального, т. е. будет меньше испытательного напряжения, трансформаторов и выключателей. Что касается длительности воздействия такого перенапряжения, то при посредстве специальной защитной аппаратуры она может быть ограничена десятыми долями секунды. Кроме того, можно поставить специальные требования к защите, сводящиеся к тому, чтобы при отключении выключателя на московском конце линии немедленно посредством высокочастотных импульсов, передаваемых по проводам 300-кВ линии передачи, автоматически отключались выключатели куйбышевского конца линии передачи.

Таким образом рассмотренный исключительный режим не может быть основанием для установки реакторов на приемном конце линии передачи.

**Выбор перепада напряжения при номинальном режиме работы линии передачи.** Принятая на рис. 11 схема прымкания линии передачи к московской энергосистеме предполагает объединение всех генераторов каждой подсекции на 110-кВ «шинах подсекций», от которых предположено питание всех потребителей данной подсекции. Эти «шины» мыслится осуществленными

в виде ряда 110-кВ линий, снабженных быстрой действующей селективной защитой.

Предполагается, что при изменениях мощности передаваемой из Куйбышева, напряжение в этих «шинах», точнее, в точках прымкания к ним автотрансформаторов куйбышевской линии, будет поддерживаться постоянным и равным 110 кВ путем регулирования возбуждения генераторов данной подсекции московской энергосистемы. Второй точкой, в которой напряжение должно поддерживаться постоянным, выбрано начало линии, т. е. зажимы повышающих трансформаторов куйбышевских гидростанций. Здесь напряжение принято равным 300 кВ. Так как коэффициент трансформации автотрансформаторов принят равным 300/110, то между началом линии и «шинами» 110-кВ перепад напряжения равен нулю. Контрольные расчеты с положительным и отрицательным перепадом дали менее благоприятные результаты с точки зрения статической устойчивости передачи.

**Распределение напряжения вдоль линии при разных нагрузках** приведено на рис. 2<sup>6</sup>. Из рисунка яствует, что на высшей стороне автотрансформаторов приемного конца линии передачи напряжение при переходе от нагрузки в 150 МВт до нуля или обратно изменяется на 1,3% относительно среднего значения, равного 311 кВ (колебания 315—307 кВ).

При передаче 150 МВт наибольшее напряжение, получающееся в точке, которая отстоит от московского конца линии на 380 км (около 45% длины линии), достигает 324 кВ, т. е. превышает номинальное на 8%. При холостом ходе линии передачи напряжение в этой точке достигает 342 кВ, т. е. превышает номинальное на 14%. Такое изменение будет, очевидно, весьма кратковременно, причем, если отказаться от постоянства напряжения на куйбышевском конце линии передачи, то наивысшее напряжение в упомянутой точке линии передачи можно ограничить 324 кВ, а в таком случае всю линию передачи можно изолировать на это напряжение.

Все приведенные данные относятся к работе линии передачи на одну подсекцию московской энергосистемы; при работе на обе подсекции соотношения будут более благоприятными.

**Статическая устойчивость.** При обычно применяемом принципе передачи энергии по связанным электрически цепям максимальная надежно передаваемая мощность определяется динамической устойчивостью линии передачи; по этой причине расчетам статической устойчивости до последнего времени уделялось мало внимания, и их обычно производят достаточно грубым образом лишь с целью получения ориентировочных данных до производства расчетов динамической устойчивости, требующих много времени и труда.

При блоковой схеме передачи энергии предельная надежно передаваемая мощность определяется, как было отмечено выше, статической устойчивостью линии передачи. Это обстоятельство побудило подвергнуть методы расчета статической устойчивости дополнительной теоретической разработке, что было выполнено А. А. Го-

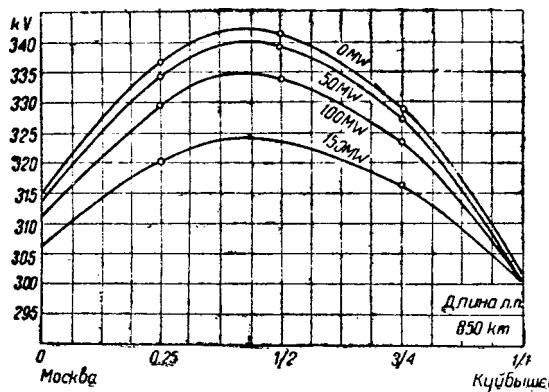


Рис. 2

ревым. Этот вопрос, естественно, занял центральное место во всем проекте линии передачи Куйбышев—Москва и потребовал большого числа контрольных расчетов<sup>7</sup>. Так как на эту тему А. А. Горевым опубликована в № 11 «Электричества» особая статья, то здесь приводятся только конечные результаты произведенных расчетов.

Согласно этим расчетам предел статической устойчивости с увеличением перепада напряжения понижается, что и послужило причиной выбора нулевого перепада (см. выше).

Сокращение длины линии передачи с 900 до 850 km дает увеличение предела статической устойчивости (в интерпретации этого понятия, предложенного А. А. Горевым) на 10 MW.

При работе на две подсекции московской энергосистемы предел статической устойчивости приблизительно на 8 MW выше, чем при работе на одну подсекцию.

Реальный предел статической устойчивости передачи при работе на одну подсекцию с учетом влияния потребителей и генераторов московской энергосистемы составляет 214 MW; при работе на две подсекции — около 222 MW.

На основании этих расчетов было признано возможным принять мощность, передаваемую по одному 300-kV цепи передачи, в 160 MW, что отвечает запасу статической устойчивости в 34% при работе на одну подсекцию и около 40% при нормальной работе на две подсекции.

Следует отметить, что при нагрузке 160 MW и работе на одну подсекцию угол расхождения между вектором э. д. с. куйбышевского гидрогенератора, работающего на линию передачи Куйбышев—Москва, и вектором постоянного напряжения на 110-kV шинах приемного конца линии передачи получился равным, кругло 65°. Коэффициент мощности гидрогенераторов получился равным 0,935.

**Динамическая устойчивость передачи**<sup>8</sup>. При принятой блоковой схеме передачи (рис. 1) аварии на одноцепной линии передачи ведут к отключению ее от московской энергосистемы. При этом, однако, толчок, вызванный аварией на линии, и потеря мощности, поступавшей в систему через отключившуюся цепь, не вызывают воставшейся части системы таких качаний, при кото-

рых машины этой части системы выпали бы из синхронизма.

Кроме этого случая, динамическая устойчивость (при применении блоковой схемы передачи энергии) должна быть обеспечена при любой аварии внутри московской энергосистемы при том, разумеется, условии, что аварийный участок отключается достаточно быстро соответствующей защищой.

Расчеты динамической устойчивости линии передачи Куйбышев—Москва при авариях внутри московской энергосистемы велись при параметрах куйбышевских гидрогенераторов, несколько ухудшенных по сравнению с окончательно принятыми. Кроме того, были сделаны следующие упрощения: 1) не учитывалось активное сопротивление; 2) приемники были заменены эквивалентной постоянной проводимостью; 3) машины замещались постоянными э. д. с. за их переходными реактивностями.

Были рассмотрены аварии в наиболее неблагоприятных точках, причем предполагалось, что авария имеет характер трехполюсного короткого замыкания<sup>9</sup>. Произведенные расчеты показали, что непрерывная подача энергии из Куйбышева в Москву по принятой блоковой схеме передачи может быть обеспечена во всех случаях при условии, что к моменту сооружения передачи Куйбышев—Москва московская энергосистема будет обладать на своих главных распределительных магистралях селективной защитой, позволяющей отключать аварийные участки в 0,15—0,20 sec.

**Капитальные затраты на сооружение по блоковой схеме передачи одной 300-kV цепи линии передачи Куйбышев—Москва**<sup>10</sup>. При применении блоковой схемы передачи согласно рис. 1 капитальные затраты на одну 300-kV цепь линии передачи Куйбышев—Москва выразились в сумме 99 200 000 руб. При передаваемой по одной цепи мощности в 160 MW это составляет 620 руб. на передаваемый киловатт.

В этой сумме учтена как стоимость линии передачи, так и полная стоимость оборудования отправного и приемного конца одной цепи, считая от зажимов низшего напряжения повышающих трансформаторов куйбышевских гидростанций до точки примыкания передачи к 110-kV шинам московской энергосистемы, т. е. включая 110-kV ячейки приемных автотрансформаторов в Москве. При этом стоимость сооружения 1 km 300-kV цепи на одноцепных металлических опорах (со всеми начислениями) выразилась в сумме 94 000 руб.

Все оборудование предположено союзного изготовления.

Составлению сметы было уделено очень большое внимание, и есть основание полагать, что она не занижена. При этом следует отметить, что стоимость сооружений линии передачи была взята по одноцепному варианту опор, в то время как имеются все основания применить двухцепные опоры, что дает на 1 km одной цепи снижение стоимости кругло на 10 000 руб. При длине

<sup>7</sup> В первой стадии расчетов участвовал В. И. Иванов, окончательные расчеты произведены П. Е. Шпором.

<sup>8</sup> Расчеты были произведены А. А. Вульфом.

<sup>9</sup> Наиболее тяжелый случай короткого замыкания.

<sup>10</sup> Сметы были составлены Н. Н. Крачковским и П. В. Третевелом.

цепи в 850 км переход на двухцепные опоры дает экономию на одну цепь в 8 500 000 руб. Эту сумму мы рассматриваем как резервную, чтобы иметь уверенность, что вышеуказанные затраты в сумме 620 руб. на передаваемый в московскую энергосистему киловатт являются предельными.

Возможность применения двухцепных 300-kV опор. Эту возможность можно мотивировать следующими соображениями:

1. При сооружении линии передачи Boulder-Dam—Los Angeles участок линии длиной 66 км, прилегающий к городу Los Angeles и идущий по равнинной местности с более легкими метеорологическими условиями, чем на остальной части трассы этой линии передачи, осуществлен на двухцепных опорах; трассу линии передачи Куйбышев—Москва едва ли есть основание считать особо неблагоприятной в метеорологическом отношении.

2. Против двухцепных опор выдвигаются мотивы двоякого рода. Во-первых, указывают, что вследствие большей высоты и вертикального расположения проводов одной цепи эти опоры менее грозоупорны, чем одноцепные, более низкие и с горизонтальным расположением фаз. Теоретически это верно, но нельзя не учитывать, что по мере возрастания напряжения линии передачи грозовые перенапряжения становятся все менее и менее опасными. При напряжении 300 kV и применении надлежащих мер защиты (соответствующим образом расположенные тросы и надлежащим образом выполненные заземления опор) есть основание ожидать, что грозовых выключений на таких линиях передачи можно вполне избежать; эти надежды мы основываем на опыте эксплуатации 154-kV линии передачи Днепрогэс—Днепропетровск—Днепродзержинск (Каменское), на которой в течение 5 грозовых сезонов не было ни одного грозового отключения.

Второе возражение против двухцепных опор — это указание на более трудный монтаж линий на таких опорах по сравнению с монтажем на одноцепных опорах, а также более трудные условия эксплуатации. Это указание тоже верно, но едва ли оно может служить достаточным основанием для столь значительных дополнительных расходов на сооружение 850-км линии передачи, тем более, что при блоковой схеме передачи, сооружаемой при наличии на приемном конце линии передачи вращающегося резерва, выключение цепи передачи не связано с такими неприятностями, какие несет за собой выключение линии передачи, работающей по обычной связанной схеме передачи.

Себестоимость энергии. При передаче по одной цепи линии передачи Куйбышев—Москва 160 MW и при 1500 h использования себестоимость передачи энергии (исчисленная согласно действующим в СССР законоположениям) получилась равной 1,58 коп/kWh. Себестоимость энергии на шинах куйбышевских гидростанций по исчислению Куйбышевского управления равна 0,6 коп/kWh; стоимость потерь, отнесенная к энергии, переданной на 110-kV шине Москвы, получилась равной 0,06 коп/kWh. Таким образом полная себестоимость энергии Куйбышевского гидроузла на 110-kV шинах Москвы равна 2,24 коп/kWh. Срав-

нение этой величины со стоимостью энергии на тех же 110-kV шинах при выработке ее на конденсационных станциях и том же числе часов использования (работа на верхней части графика) дает столь значительную экономию, что в рентабельности сооружения 300-kV линии передачи Куйбышев—Москва по блоковой схеме не может быть никакого сомнения.

Эффект применения при блоковой схеме передачи Куйбышев—Москва напряжения 400 kV. Составленный э. ч. Ленгидэпа соответствующий вариант дал совершенно такие же экономические показатели, как и вариант на 300 kV. Это сравнение, однако, нуждается в серьезных оговорках. Как уже было отмечено выше, для составления реального инженерного проекта линии передачи на 400 kV в настоящее время нет надлежащих ни технических ни экономических данных, так как это напряжение нигде еще не осуществлено. Вследствие этой причины как реактивности трансформаторов, так и стоимости трансформаторов и аппаратуры на 400 kV, принятые в проекте, носят грубо ориентировочный характер. На результат подсчета стоимости варианта на 400 kV оказало влияние, кроме того, несоответствие между мощностью отдельных гидрогенераторов куйбышевских гидростанций и мощностью, которую при 400-kV варианте оказалось возможным при блоковой схеме передавать из Куйбышева в Москву по одной 400-kV цепи (при том же коэффициенте запаса статической устойчивости, какой был принят в варианте на 300 kV).

Последнее обстоятельство показывает, что при напряжениях 300 kV и более высоких выбор мощности отдельных агрегатов гидростанций нельзя делать, как это практиковалось до сих пор, без учета электроэнергетических соображений. Здесь мы, таким образом, вновь наталкиваемся на проявление в ощущительной форме качественных различий, порождаемых накоплением количественных изменений. Следует отметить также, что вследствие удвоения при 400 kV мощности, передаваемой по одной цепи, по сравнению с вариантом на 300 kV, усложняется и удорожается схема примыкания 400-kV цепи к московской энергосистеме, так как требуется (по условиям токов короткого замыкания приемного конца) увеличить число подсекций московской энергосистемы, приходящихся на одну цепь блоковой линии передачи.

Суммируя вышеизложенное, можно высказать предположение, что при надлежащем изменении мощности куйбышевских гидрогенераторов (если такое изменение окажется возможным по условиям производства гидроагрегатов) и при уточнении технических и экономических данных 400-kV оборудования вариант на 400 kV даст в конечном счете некоторое снижение себестоимости энергии, передаваемой на шины московской энергосистемы по сравнению с вариантом на 300 kV.

При этом, справедливости ради, нужно указать и соображения, которые могут оказаться не в пользу варианта на 400 kV. Во-первых, вследствие того, что при 400 kV мощность, передаваемая по одной цепи, почти в два раза больше, чем в 300-kV варианте, потребуется удвоение враща-

щегося резерва в московской энергосистеме. Во-вторых, если намечаемые способы компенсации самоиндукции линии передачи приведут к ожидаемым результатам, то тогда пределы передаваемой мощности и расстояний вырастут для 300-kV линии передачи настолько, что область экономического применения 400 kV сдвинется в сторону еще больших мощностей и расстояний передачи.

**Выводы.** Составленный э. ч. Ленгидэпа эскизный проект передачи энергии из Куйбышева в Москву по блоковой схеме при напряжении 300 kV имел своей основной целью дать ответ на вопрос, возможна ли при достигнутом в настоящее время уровне техники передача энергии из Куйбышева в Москву при приемлемых технико-экономических показателях?

Ответ получился положительный, вследствие чего повисшая одно время в воздухе проблема использования энергии Куйбышевского гидроузла вновь, притом окончательно получила реаль-

ную базу и может быть без всяких сомнений поставлена в порядок дня союзного гидроэнергостроительства в третьей пятилетке. При этом исчисленные на основе упомянутого проекта капитальные затраты на сооружение передачи Куйбышев — Москва представляют собой, несомненно, тот высший предел затрат, которого можно ожидать. Дальнейшая работа над вопросами, которые возникли в связи с проектом, в том числе над методами компенсации линий передачи и над применением более высоких напряжений, должна, несомненно, привести к некоторому снижению исчисленных капитальных затрат, а следовательно, и к снижению себестоимости передаваемой в Москву энергии Куйбышевского гидроузла. Какого размера будет это снижение, сейчас трудно предвидеть, можно лишь привести, что на установке Boulder-Dam — Los Angeles удачное разрешение вопроса о переходе с 220 на 287 kV снизило себестоимость передачи энергии на 17%.

## Кислородно-цезиевые фотоэлементы

CAESIUM-OXYGENOUS PHOTO-CELLS MANUFACTURED BY „ELECTROSAVOD“ MOSCOW WORKS

А. А. Соколов

Лаборатория фотоэлементов ЭлектроКомбината им. В. В. Куйбышева

**В** СССР в массовом масштабе фотоэлементы используются только в звуковом кино, тогда как за границей они широко применяются в автоматике и для множества других целей.

Ввиду огромных возможностей фотоэлектронной автоматики важно установить сравнительное качество наших и заграничных фотоэлементов. Только сопоставление характеристик образцов различных фирм может ответить на такие вопросы, как, например: можно ли с нашими фотоэлементами построить совершенные автоматы? Каков должен быть оптимальный режим фотоэлемента данной фирмы в конкретном случае его применения? Не является ли ограниченное применение наших фотоэлементов следствием их худшего качества и т. д. и т. п.

В настоящей работе изложены подробные технические данные наших и заграничных фотоэлементов, необходимые для проектирования фотоэлектрических приборов. Кроме того, на базе сопоставления характеристик различных фотоэлементов намечаются способы улучшения параметров фотоэлементов ЭлектроЗавода.

Описываются только кислородно-цезиевые фотоэлементы как получившие наибольшее распространение. Измерения были массовыми. Приведенные характеристики дают средние значения результатов массовых измерений.

**Фотоэлемент.** Принцип работы фотоэлемента с внешним фотоэффектом заключается в вырывании

электронов квантами света из поверхности чувствительного к свету фотокатода. Вырванные электроны собираются на другой электрод-анод, на который накладывается положительный потенциал. Стеклянная запаянная колба, в которой помещаются оба электрода, наполняется нейтральным газом, обычно аргоном. Электроны, двигаясь к аноду, ионизуют молекулы газа; освобожденные таким образом электроны также стремятся к аноду; получается газовое усиление фототока.

С точки зрения электротехники фотоэлемент представляет собой активное сопротивление, величина которого при постоянном рабочем напряжении обратно пропорциональна величине светового потока, падающего на фотокатод. Это сопротивление весьма велико —  $1,2 \cdot 10^2$  —  $6 \cdot 10^4$  М $\Omega$  не подчиняется закону Ома (проводимость только в одном направлении и ток зависит от напряжения нелинейно) и в широких пределах безинерционно. Итак, сущность работы фотоэлемента состоит в превращении изменений света в изменения электрического тока.

ЭлектроЗавод изготавливает 5 типов фотоэлементов, отличающихся между собою только разной формой колбы и различной чувствительностью. Все пять типов предназначены для работы в звуковом кино. Конструктивно эти фотоэлементы представляют собой (рис. 1-4) сферическую стеклянную колбу (толщина стекла 0,5 mm), на



Рис. 3. Фотоэлемент ЦГ3

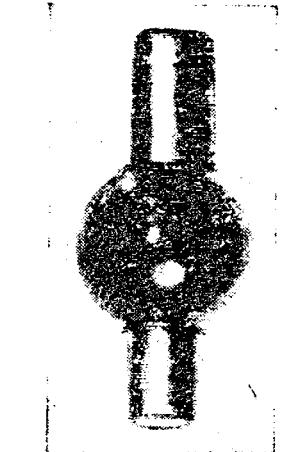


Рис. 1. Фотоэлемент ЦГ1

внутренней стенке которой на подкладке из серебра имеется сложный кислородно-цециевый фотокатод. Никелевый анод помещается в центре колбы; он имеет форму диска  $d = 6$  мм — ЦГ1 или колечко  $d = 6$  мм — ЦГ2 — ЦГ5. Все фотоэлементы наполняются аргоном, нормальными типами являются ЦГ1 — ЦГ5: вакуумные фотоэлементы типы ЦВ1 — ЦВ5 изготавливаются по отдельным заказам.

Основные данные, характеризующие каждый отдельный тип, приведены в табл. 1. Габаритные размеры указаны на рис. 5-9.



Рис. 2 Фотоэлемент ЦГ2 в футляре

Рис. 4. Фотоэлемент ЦГ4 [www.booksite.ru](http://www.booksite.ru)

### Таблица 1

Габаритные размеры тип см <sup>2</sup>						Вес gr		Максимальная допустимая температура °C	
заполеванные без футляра в металлическом футляре						запо- площадь		в фут- ляре	
диаметр	высота	наибол-	высо-	запо-	в фут-	запо-	в фут-	запо-	
нанооль- чая лин- на	метр	често- чувст- тельная поверх- ность	наи- боль- шая	площадь	запо-	запо-	запо-	запо-	
колбы	центра	длины	окна	окна	запо-	запо-	запо-	запо-	
длина	диаметр	диаметр	диаметр	диаметр	запо-	запо-	запо-	запо-	
125 ± 5	55 ± 1	78 ± 3	20,0	—	—	—	50 ± 3	—	
75 ± 5	39 ± 1	52 ± 3	12,5	128 ± 1	45	79 ± 1	3,94	110 ± 4	
57 ± 3	26 ± 1	30 ± 1	4,7	—	—	—	13 ± 2	—	
1122 ± 3	39 ± 1	79 ± 2	9,0	128 ± 1	45	79 ± 1	3,94	55 ± 3	
68 ± 1	39 ± 1	8,0	—	—	—	—	22 ± 3	108 ± 4	

При мечани е. Межуэлектродные ёмкости ЦГ около 1,5—2 сп; ёмкость ЦГ2 — ЦГ3 в алюминиевом футляре — 2,7—3,15 сп. За границей наибонее рас пространена цилиндрическая или эллипсоидальная форма колбы; анод в виде проволочного стержня, расположенного параллельно ёмкости колбы (RCs и др.), или в виде проволочной петли (Pressler и др.), а также другие конструкции, приближающиеся к этой (Фирма Ostam и др.) Мечанием

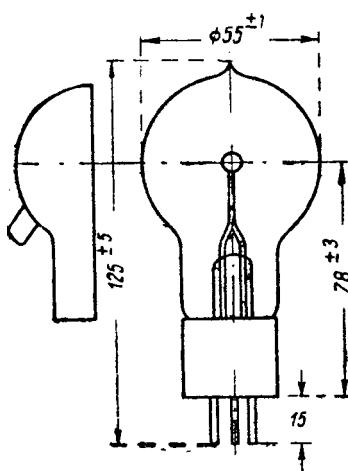


Рис. 5. Фотоэлемент ЦГ1

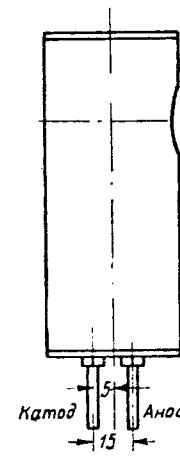


Рис. 6. Фотоэлемент ЦГ2 в футляре

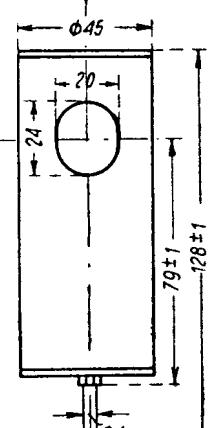


Рис. 7. Фотоэлемент ЦГ3

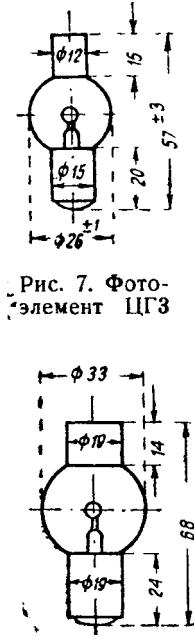


Рис. 8. Фотоэлемент ЦГ4

Рис. 9. Фотоэлемент ЦГ5

**Интегральная чувствительность.** Бессспорно, важнейшей характеристикой фотоэлемента является его интегральная чувствительность  $\Sigma_i$  — его чувствительность по току, обычно выражаемая в  $\mu\text{A/lm}$ . Интегральная чувствительность представляет собой отношение фототока, протекающего через фотоэлемент, к падающему на него световому потоку при данном рабочем напряжении.

Таким образом  $\Sigma_i = \frac{i}{F} \mu\text{A/lm}$ . Это определение будет ясно в том случае, если указана цветовая температура источника света  $t_w$  (вольфрамовой осветительной лампой), с которым были сделаны измерения (табл. 2).

Одной общепринятой температуры до сих пор не установлено. В Англии принята  $t_w = 2848^\circ\text{K}$  (BSI, 1935), в Америке  $2870^\circ\text{K}$  (IRE).

Измерение  $\Sigma_i$  на «Электрозаводе» производится

на простой оптической скамье при  $t_w = 2850^\circ\text{K}$ . Подсчет  $\Sigma_i$  ведется по формуле

$$\Sigma_i = \frac{i}{F} = \frac{n j^2}{s I_{cs}} = \frac{n j}{e s},$$

где  $i_w$  — фототок в  $10^{-6}\text{A}$  при рабочем напряжении 240 V;

$F$  — световой поток, падающий на фотоэлемент, в lm;

$n$  — отклонение гальванометра;

$j$  — цена одного деления гальванометра в  $10^{-6}\text{A}$ ;

$s$  — площадь диафрагмы в  $\text{m}^2$ ;

Таблица 2

Город	Фирма	Тип	$\Sigma_i$ при напряжении		Рабочее напряжение V	Потенциал зажигания (V) при светопотоке 0,06—0,1 lm V
			$\mu\text{A/lm}$	V		
Москва	«Электрозавод»	ЦГ1 — ЦГ5	75—350	240	240	300
		ЦГ1 — ЦГ5	40—120	100	240	300
Leipzig	Pressler	Technik	100—600	100	100—120	150
		Tcnfilm	300—900	100	60—100	140
Berlin	AEG	353012, 353092, 353101, 353028, 353103, 353105, 353107 и др.	50—100	100	80—100	150
			30—60	100	80—100	150—250
Berlin	Rectron	R12G, R12S, R15S	100—150	100	130	200
		R11G	70	100	130	200
Dresden	Zeiss	G	80—120	90	90	150
		Cw8, Cw22	—	—	—	—
London	Osram	Cw24, Cw27	100—150	90	90	120—150
		Cs	100—140	90	90	120
Paris	Galois	3A	60	90	90	150—170
		868, 918	55—110	90	90	125
Boulogne	Le Materiel Téléphonique	SK-60, WL735, WL737	60	90	90	130
		DSK 63	125	90	90	130
Camden USA	RCA	CE1, CE2, CE4, CE5, CE3, CE7	100	90	90	125
		Серия 4	150	90	90	125
Bloomfield N. Y.	Westinghouse	CE1, CE2, CE4, CE5, CE3, CE7	50—70	90	90	100
		Серия 4	50—70	90	90	100
Chicago	Herman A De Vry					
New-York	Raytheon Production Corporation					

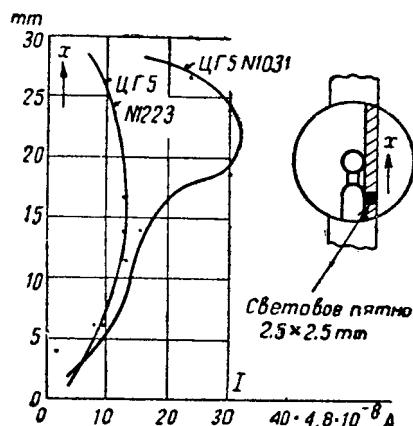


Рис. 10. Неравномерность чувствительности по катоду ЦГ5

$I_{cv}$  — сила света в свечах в направлении фотодиода;  
 $e$  — освещенность в Ix.

Интегральная чувствительность вакуумного фотоэлемента «Электрозвод» лежит в пределах 13—40  $\mu\text{A}/\text{lm}$ , в среднем около 20  $\mu\text{A}/\text{lm}$ . Примерно такую же чувствительность имеют и вакуумные фотоэлементы заграничных фирм. Максимальной достигнутой в настоящее время чувствительностью вакуумного цезиевого фотоэлемента

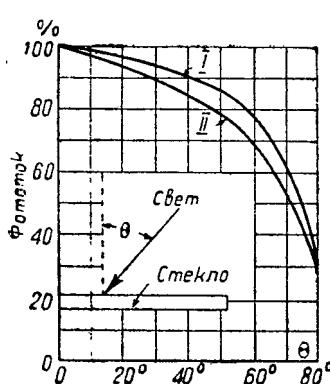


Рис. 11. Прохождение света через стекло под углом  
I — измерено с фотоэлементом ЦГ1,  
II — по данным Неппау

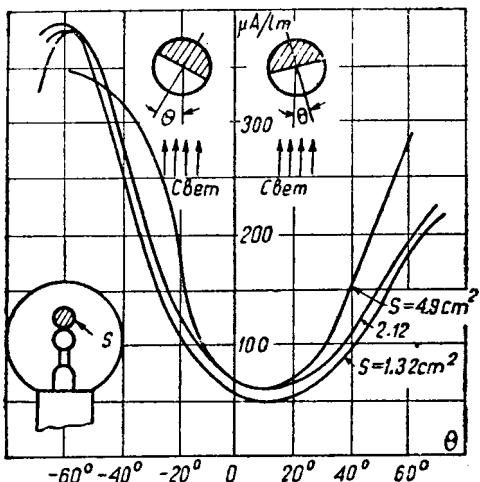


Рис. 12. Изменение чувствительности фотодиода ЦГ1 при повороте его вокруг вертикальной оси

при специальном методе его обработки можно считать 70  $\mu\text{A}/\text{lm}$ . Интегральная чувствительность газонаполненных цезиевых фотоэлементов различных фирм приведена в табл. 2.

Цезиевые фотоэлементы имеют вообще более равномерную чувствительность в отдельных точках катода, чем, например, калиевые. Равномерность чувствительности существенно необходима для некоторых специальных схем и имеет также значение для уменьшения искажений при работе фотоэлемента в звуковом кино. Фотоэлементы ЦГ2—ЦГ5 обнаруживают некоторое увеличение чувствительности в центре (рис. 10), что объясняется большей потерей света при прохождении

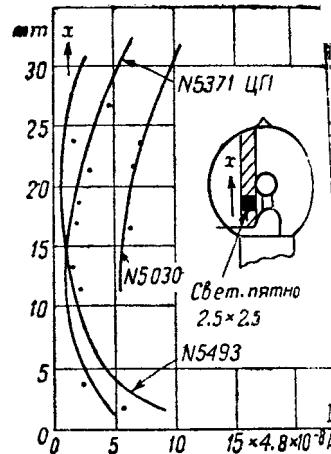


Рис. 13. Неравномерность чувствительности по катоду фотодиода ЦГ1 при фронтовом падении света

его через стекло под углом (рис. 11), а также определенным распределением электрического поля, присущим этим фотоэлементам, обусловленной конфигурацией их электродов.

ЦГ1 особенно наглядно характеризует влияние распределения поля на чувствительность фотоэлемента в отдельных точках катода. В фотоэлементе ЦГ1 при повороте его вокруг вертикальной оси максимум фототока наступает при угле поворота  $\Theta \approx 50^\circ$  (рис. 12). Для большинства фотоэлементов ЦГ1 этому углу соответствует увеличение чувствительности в 5 раз. Вообще же увеличение чувствительности изменяется от 2 до 16,5 раза. При замене диска шариком или кольцами разных диаметров увеличение  $\Sigma = f(\Theta)$  наблюдается только в отдельных экземплярах. На рис. 13 показана неравномерность чувствительности ЦГ1 при фронтовом падении света. Здесь также, хотя и в меньшей мере, наблюдается увеличение чувствительности на краях катода.

Изучение чувствительности фотоэлемента на малых участках его катода показывает, что при фронтовом падении света ЦГ1 имеет «слепое пятно», равное площади диска анода. На катодах ЦГ2—ЦГ5 это пятно появляется через несколько часов работы. Это явление обусловлено тем, что кольцо анода этих фотоэлементов фокусирует стремящиеся к катоду положительные ионы, благодаря чему ионы сбиваются с серебряной подложки чувствительный слой, обнажая ее на площадке диаметром около 9 mm; более того, ионы сбиваются слой серебра до самого стекла колбы на площадке диаметром 2—2,5 mm (рис. 14). Чувствительность слепого пятна ЦГ2—ЦГ5 весьма мала.

Заграничные фотоэлементы обладают более равномерным распределением чувствительности (рис. 15).

Неравномерность чувствительности по катоду не дает возможности проводить фотометрирования с разной площадью диафрагмы. Кроме того, при повторных измерениях чувствительности одного и того же фотоэлемента световой пучок должен падать точно на одно и то же место катода.

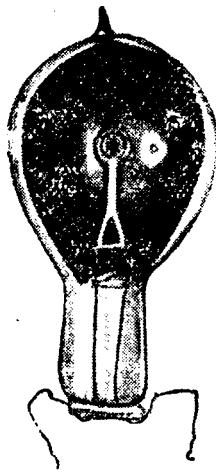


Рис. 14. Слепое пятно на катоде фотоэлемента ЦГ2 после нескольких часов работы

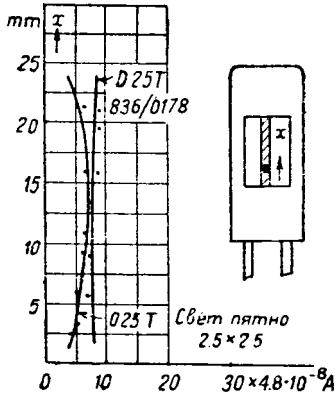


Рис. 15. Неравномерность чувствительности по катоду фотоэлемента D25 T фирмы Pressler при фронтовом падении света

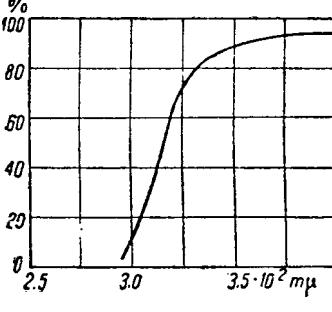


Рис. 17. Проницаемость стекла (толщина 0,5 мм) колб ЦГ1 — ЦГ2

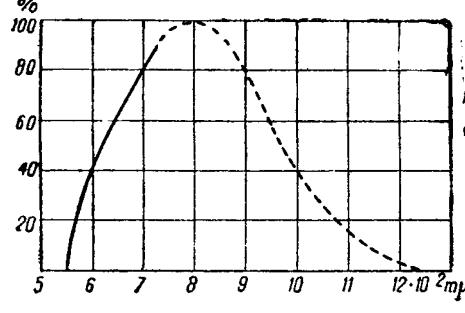


Рис. 18. Спектральная характеристика ЦГ3, покрытого красным лаком

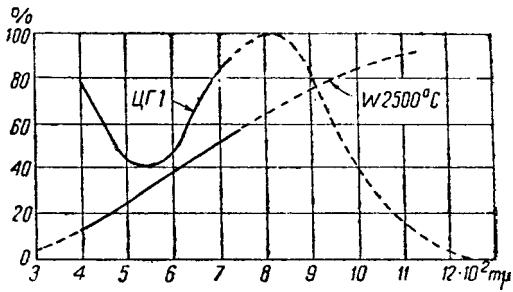


Рис. 16. Спектральная характеристика ЦГ1 и вольфрамовой нити при  $T = 2500^{\circ}\text{C}$

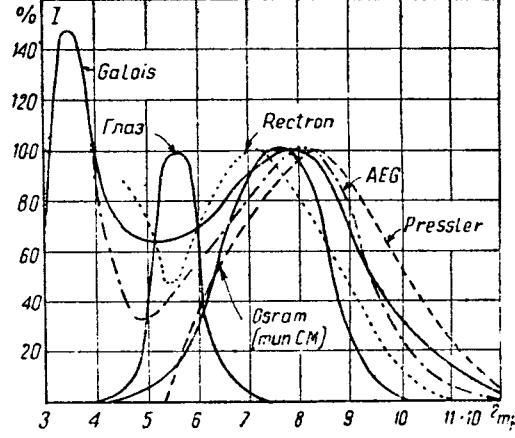


Рис. 19. Спектральные характеристики фотоэлементов европейских фирм и среднего человеческого глаза

**Спектральная характеристика.** Зависимость фототока от длины волны падающего света  $i = f(\lambda)$  для цезиевых катодов имеет следующие особенности: а) резко выраженный селективный максимум чувствительности лежит в красной части спектра при  $\lambda_{\max} \approx 8000 \text{ \AA}^{\circ}$ ; б) красный порог фотоэффекта  $\lambda_0$  в области  $9000-13000 \text{ \AA}^{\circ}$ ; в) имеется возможность сдвига  $\lambda_{\max}$  и  $\lambda_0$  изменением процесса обработки фотокатода.

Форма спектральной характеристики цезиевого фотоэлемента хорошо совпадает с кривой распределения энергии в спектре лампы накаливания. На рис. 16 показана средняя спектральная характеристика ЦГ1 и распределение лучистой энергии по длинам волн вольфрамовой нити при  $T = 2500^{\circ}\text{C}$ . Измерена только часть характеристики, лежащая в видимом спектре, невидимая часть характеристики, проведенная пунктиром, является ориентировочной и построена по литературным данным. Характеристики других типов фотоэлементов — ЦГ2—ЦГ5 — близко совпадают с характеристикой ЦГ1, показанной на рис. 16.

Форма спектральной характеристики зависит от материала катода, степени его чистоты и обезгаживания и, главное, от способа обработки; у готового фотоэлемента она также меняется от температуры и со временем работы. Сдвиг  $\lambda_{\max}$  достигает  $\pm 1000 \text{ \AA}^{\circ}$  (от  $8000 \text{ \AA}^{\circ}$ ). Чувствительность к ультрафиолету ограничивается поглощением света в стекле. На рис. 17 показана ха-

рактеристика стекла № 83, из которого изготавливаются колбы фотоэлементов «Электрозавода».

С целью увеличения стабильности фотоэлемент ЦГ3 выпуска 1936 г. покрывался красным нитролаком, однако, это мероприятие при толщине пленки 0,01 (двойное покрытие) приводит к уменьшению интегральной чувствительности на 9%.

Лак полностью поглощает свет, длина волны которого меньше чем  $5500 \text{ \AA}^{\circ}$ ; он термоустойчив, что было проверено испытанием при  $70^{\circ}\text{C}$  в течение 73 ч и также устойчивым к непрерывному действию освещенности в 500 lx в течение 700 ч при температуре  $33^{\circ}\text{C}$ . Удельное поверхностное сопротивление лаковой пленки  $10^{12} \Omega/\text{см}^2$ . В 1937 г. покрытие лаком фотоэлементов ЦГ3 не производится, так как оно не дало желательного увеличения стабильности. Лак можно с успехом использовать в качестве стабильного светофильтра.

Спектральная характеристика ЦГ3, покрытого красным лаком, дана на рис. 18. Для сравнения на рис. 19 приведены спектральные характеристики фотоэлементов европейских фирм Pressler, Galois, Rectron, AEG и характеристика среднего человеческого глаза, а на рис. 20 — характеристики фотоэлементов американских фирм — RCA, Westinghouse, De Vry. Приведенные характеристики показывают полную возможность использования цезиевого фотоэлемента для работы в инфракрасной части спектра. Относительную ве-

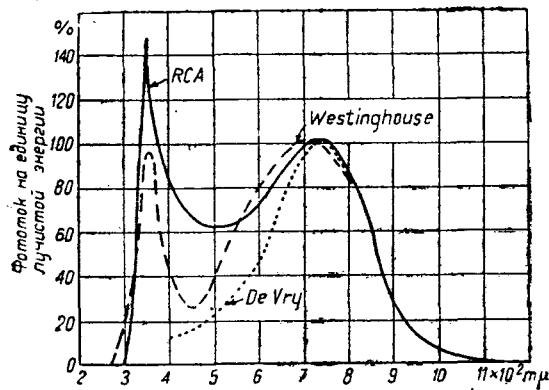


Рис. 20. Спектральные характеристики фотоэлементов американских фирм

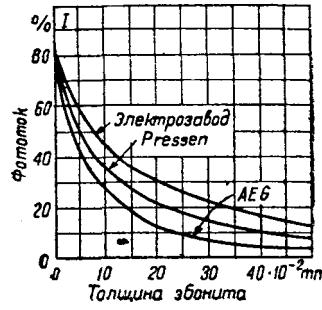


Рис. 21. Чувствительность фотоэлементов разных фирм к инфракрасным лучам (средняя из 10 фотоэлементов каждой фирмы)

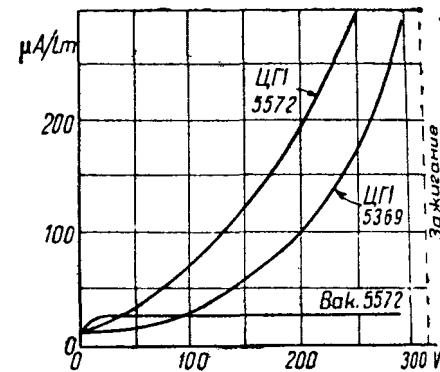


Рис. 22. Характеристика чувствительности напряжение фотоэлемента ЦГ1

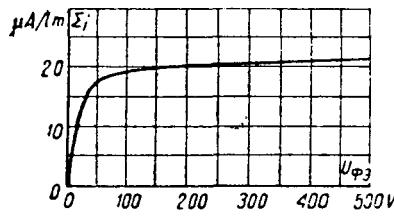


Рис. 23. Характеристика чувствительность-напряжение фотоэлемента ЦВ2

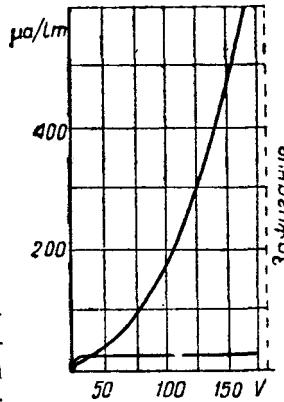


Рис. 24. Характеристика чувствительность-напряжение фотоэлемента серии «техник» фирмы Presler

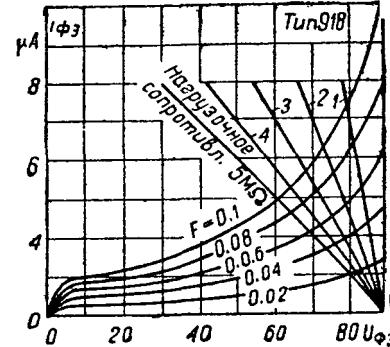


Рис. 25. Характеристика ток-напряжение фотоэлемента RCA типа 918

личину красной части спектральной характеристики цезиевых фотоэлементов разных фирм характеризует рис. 21, на котором дана величина фототока в зависимости от толщины эбонита, поставленного на пути светового луча. При толщине эбонита в 0,3 мм средний глаз почти не ощущает света, тогда как еще останется 25% фототока в фотоэлементах «Электрозводства»: фотоэлементы Pressler и AEG менее чувствительны к инфракрасным лучам, чем фотоэлементы «Электрозводства».

Использование особенностей спектральной характеристики фотоэлемента — одна из наиболее интересных задач по его применению (сортировка предметов по цвету, управление химическим процессом и пр.), однако для этого требуется повышенная стабильность фотоэлементов как интегральной чувствительности, так и их спектральной характеристики.

**Статические и динамические характеристики.** Типовые статические характеристики (т. е. без включения нагрузочного сопротивления) вакуумных и газонаполненных фотоэлементов «Электрозводства» показаны на рис. 22, 23. Фотоэлементы ЦГ1—ЦГ5 значительно отличаются от одного экземпляра к другому по чувствительности и по крутизне статической характеристики в рабочей точке. Большой разброс параметров фотоэлементов ЦГ1—ЦГ5 обусловливается их методикой изготовления, высоким рабочим напряжением и отсутствием тренировки при выпуске с завода.

Нагрузочное сопротивление фотоэлемента в звуковом кино составляет 0,05—1 М $\Omega$ , падение напряжения на этом сопротивлении незначительно и характеристика практически не отличается от статической. В фотореле нагрузочное сопротивление имеет величину 3—100 М $\Omega$ . Поэтому характеристика ток-напряжение сдвигается вниз.

Уменьшение фототока в динамическом режиме легко определить графически, сместив каждую точку  $A$  характеристики вправо на величину падения напряжения на нагрузочном сопротивлении  $R$  для данного значения тока  $i_A$  (рис. 26).

В большинстве схем применение фотоэлементов используется их чувствительность по напряжению  $\Sigma_U$  — изменение напряжения на фотоэлементе с изменением светового потока. Таким образом  $\Sigma_U = \frac{dU}{dP}$ . В вакуумном фотоэлементе ток не зависит от напряжения, потому что рабочее напряжение берется выше напряжения насыщения, поэтому

$$\Sigma_U = \frac{d(\Sigma_i FR)}{dP} = \Sigma_i R V/lm (R^B \text{ М} \Omega).$$

Чувствительность по напряжению газонаполненного фотоэлемента определяется его динамической характеристикой.

Увеличение  $R$  ограничивается постоянной времени фотоэлектрической цепи и величиной утечки схемы. Увеличение  $\Sigma_i$  ограничивается тем, что при напряжениях, близких к потенциалу зажигания  $U_z$ , фотокатод быстро разрушается, и работа фотоэлементов становится весьма неустойчивой. Ряд заграничных фирм избегает поднимать рабочее напряжение выше чем на 60—65% потенциала зажигания. Рабочее напряжение на фотоэлементе

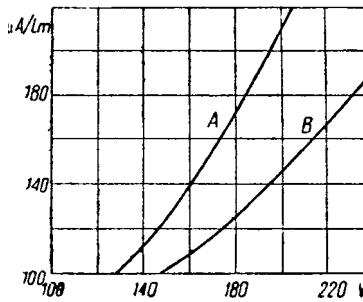


Рис. 26. Графическое построение динамической характеристики газонаполненного фотоэлемента ЦГ1  
( $F = 0,05 \text{ лм}$ ,  $R = 5 \text{ М}\Omega$ ,  $AB = \Delta U = I_A R = \Sigma I_A F R$ )

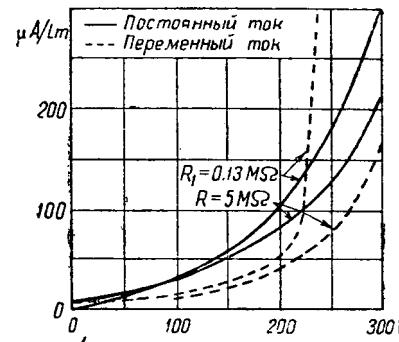


Рис. 27. Статические и динамические характеристики чувствительность-напряжение фотоэлемента ЦГ1 на постоянном и переменном токе

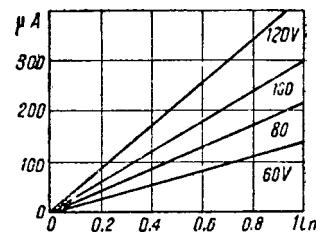


Рис. 28. Световые характеристики фотоэлемента Pressler

тах «Электрозвада» составляет 80% потенциала зажигания. Напряжение на вакуумных фотоэлементах можно повышать до 1—1,5 кВ.

Надлежащий выбор рабочего режима не менее важен, чем выбор самого фотоэлемента, для успешного его использования в условиях длительной эксплуатации. Следует заметить, что вследствие широкого разброса параметров фотоэлементов «Электрозвада» данные паспорта фотоэлементов (чувствительность, потенциал зажигания и темновой ток) недостаточно характеризуют его качества, особенно, если фотоэлемент предназначается для автоматики. Так как стабильность фотоэлемента уменьшается с увеличением крутизны его характеристики ток — напряжение, очевидно, что при данном рабочем напряжении более удовлетворительным будет экземпляр с меньшей крутизной при одинаковой чувствительности.

Во многих схемах фотореле фотоэлемент работает на переменном напряжении. В этом случае (рис. 27) в области от 0 до 140 В фототок будет приблизительно в 2 раза меньше, чем при работе на постоянном напряжении. При  $U > 160$  В фототок резко увеличивается, так как амплитуда переменного напряжения близка или превышает потенциал зажигания статической характеристики постоянного тока. Зажигание на переменном токе наступает приблизительно при 220—240 В (при  $F = 0,05 \text{ лм}$  и  $R = 5 \text{ М}\Omega$ ).

Графическое построение динамической характеристики на переменном токе затруднительно, так как вследствие искажения формы кривой тока расхождение кривых здесь больше, чем следует по формуле  $\Delta U = iR$ ; точное построение трудоемко, так как требует планиметрирования кривой тока. Графическое построение возможно до  $U_{\max} \ll U_z$ ; при  $U_{\max} \geq U_z$  ток определяется только величиной внешнего нагрузочного сопротивления и не зависит от светового потока.

Заграничные фотоэлементы работают при меньшем рабочем напряжении (порядка 90 В), разброс параметров невелик, крутизна статической характеристики меньше, чем у ЦГ1—ЦГ5.

**Газовое усиление и потенциал зажигания.** Высокое газовое усиление  $k$  выгодно, но оно ограничивается потенциалом зажигания  $U_z$ ; кроме того, характеристики фотоэлемента с повышением усиления ухудшаются; ионный ток обладает инерцией, значительно увеличиваются шумы (см. ниже).

нарушается пропорциональность фототока световому потоку, катод быстро устает. Величина газового усиления в фотоэлементе определяется давлением газа в нем, формой электродов и рабочим напряжением. Так как фотоэлементы ЦГ1—ЦГ5 наполняются аргоном по потенциальному зажиганию, вследствие различной чувствительности фотокатодов газовое усиление сильно отличается от одного образца к другому. Поэтому встречаются экземпляры, имеющие малочувствительные катоды, но которые за счет большого газового усиления имеют чувствительность порядка сотен  $\mu\text{A/lm}$  при  $U = 240$  В. Такие фотоэлементы быстро устают и сильно шумят при использовании в звуковом кино. Для звукового кино оптимальное значение  $k = 3—4$ . Для этих значений  $k$  сохраняется пропорциональность фототока световому потоку, инерция и шумы того же порядка, что и в вакуумном фотоэлементе. Для автоматики более существенна абсолютная величина фототока, чем его искажения: выбор  $k$  или, другими словами, рабочей точки характеристики ток — напряжение здесь определяется всецело условием стабильности работы фотоэлемента.

Потенциал зажигания увеличивается со временем работы фотоэлемента благодаря поглощению газа и уменьшению чувствительности фотокатода.

**Пропорциональность.** Линейная зависимость между фототоком вакуумного фотоэлемента и освещенности установлена в пределах от 1 до 100 000 лх. Характеристики газонаполненных фотоэлементов отступают от прямой при напряжениях, близких к потенциальному зажиганию. В фотоэлементах «Электрозвада» при обычных условиях их работы, когда световой поток не превышает 0,1 лм, отклонения от прямолинейной зависимости не наблюдаются. Световая характеристика фотоэлемента фирмы Pressler показана на рис. 28.

**Темновые токи.** Прием слабых сигналов ограничивается в фотоэлементе его темновыми токами, которые представляют собой термоионную эмиссию цезиевого катода и ток утечки по стеклу и по цоколю.

Форма кривой темновых токов как функции напряжения в вакуумных и газонаполненных фотоэлементах ЦГ1—ЦГ5 похожа на их характеристику ток — напряжение (рис. 29—30). Величина темновых токов в фотоэлементах без футляров при рабочем напряжении  $U = 240$  В;  $T = 26^\circ\text{C}$  и относи-

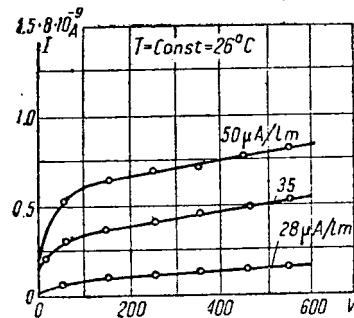


Рис. 29. Темновые токи фотоэлементов ЦВ1

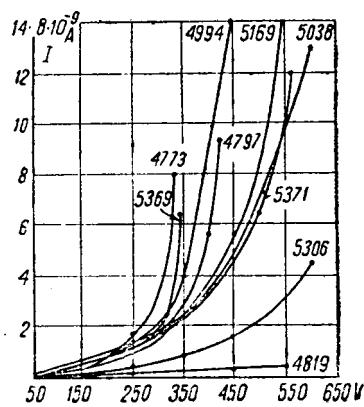


Рис. 30. Темновые токи фотоэлементов ЦВ1.

$T = 26^\circ\text{C}$  (фотоэлементы 5038, 5306 и 4819  
 $U_z > 570\text{ V}$ , а для остальных  $U_z < 570\text{ V}$ )

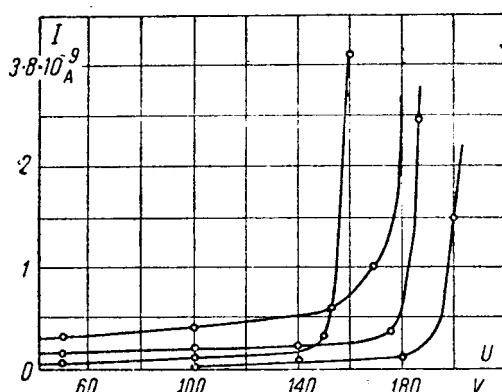


Рис. 31. Темновые токи газонаполненных фотоэлементов Pressler ( $T = 25^\circ\text{C}$ )

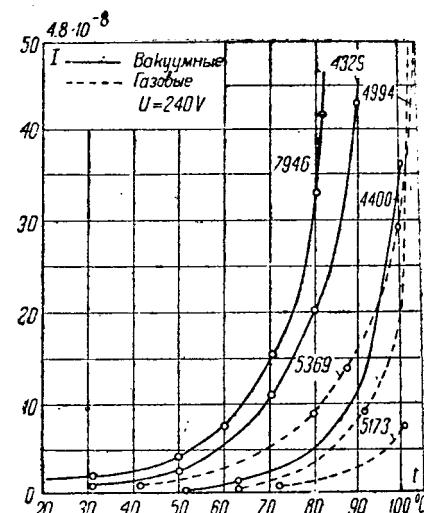


Рис. 32. Темновые токи ЦГ и ЦВ1 в зависимости от температуры

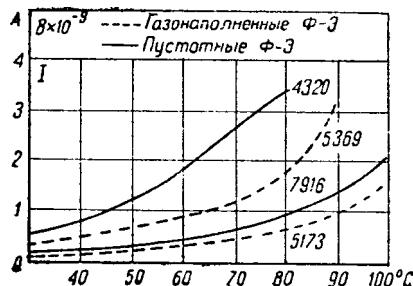


Рис. 33. Темновые токи ЦГ и ЦВ1 при обратном включении электродов

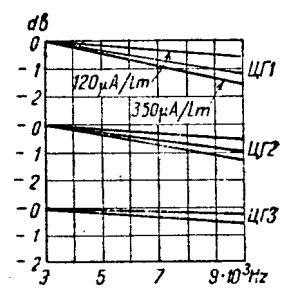


Рис. 34. Инерция фотоэлементов 'Электрозвоха' ( $U = 240\text{ V}$ )

тельной влажности 60% составляет  $8 \cdot 10^{-9}\text{ A}$ ; темновые токи фотоэлементов в футлярах — ЦГ2, ЦГ3, ЦГ5 — в среднем вдвое больше —  $1 \cdot 6 \cdot 10^{-8}\text{ A}$ . Темновой ток фотоэлементов фирмы Pressler при тех же условиях и  $U = 100\text{ V}$  равен  $4 \cdot 10^{-9}\text{ A}$ ; он почти не зависит от напряжения и начинает резко увеличиваться при потенциале, отличающемся на 10—20 V от потенциала зажигания (рис. 31).

Изменение температуры от 27 до  $50^\circ\text{C}$  удваивает темновые токи ЦГ1—ЦГ5; после  $50^\circ\text{C}$  темновой ток начинает быстро расти (рис. 32, 33). Проводимость по стеклу составляет преобладающую часть темнового тока при нагреве в  $90^\circ\text{C}$ .

Темновые токи значительно увеличиваются при повышении относительной влажности выше 60—70%.

Заграничные фотоэлементы имеют меньшие темновые токи отчасти потому, что работают при меньшем рабочем напряжении.

**Инерция.** Уменьшение фототока с увеличением частоты света, т. е. инерция фотоэлемента, имеет значение только для случаев работы с модулированным светом и в промышленных цезиевых фотоэлементах заметно проявляется при частотах выше 3000 Hz.

В автоматике инерция фотоэлемента не учитывается, так как она слишком незначительна относительно собственного времени срабатывания реле (кроме тиатронов).

Физическая сущность инерции состоит в конечности времени пробега положительных ионов электродами. Инерционны только газонаполненные фотоэлементы. Вакуумный фотоэлемент без инерционен, его частотная характеристика представляет прямую, параллельную оси абсцисс. Но на высоких частотах характеристика вакуумного фотоэлемента все же за счет междуэлектродной емкости искажается.

Инерция обычно измеряется прерыванием светового пучка, падающего на фотоэлемент, зубцами расположеннымими на краю диска, который вращается мотором с различной скоростью. Значение фототока при 1000 Hz обычно принимается за начальную точку шкалы децибел (децибел — единица усиления, равная  $20 \lg_{10} \frac{I_1}{I_2}$  и соответствующая восприятию усиления громкости средним человеческим ухом). Инерция фотоэлементов ЦГ1—ЦГ5 при рабочем напряжении  $U = 240\text{ V}$  в полосе частот от 3500 до 10 000 Hz достигает 1,3 db (рис. 34). При измерениях инерции ЦГ1—ЦГ5 по техническим причинам за начальную точку шкалы децибел была принята частота 3500 Hz. Инерция зависит от газового усиления. Фотоэлементы, имеющие большое газовое усиление, более инерционны (рис. 35). Инерция фотоэлементов фирмы Pressler при рабочем напряжении  $U = 100\text{ V}$  в полосе от 3500 до 10 000 Hz в среднем равна 1,5 db (от 1 до 2,8 db). Увеличение напряжения на фотоз

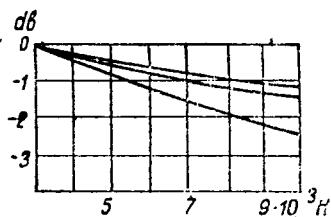


Рис. 35. Инерция фотоэлементов фирмы Pressler ( $U = 100$  V)

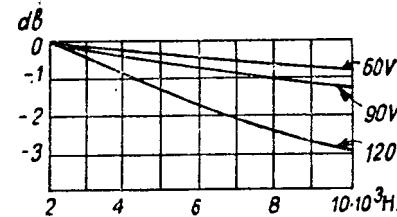


Рис. 36. Инерция фотоэлементов фирмы Pressler при разных рабочих напряжениях

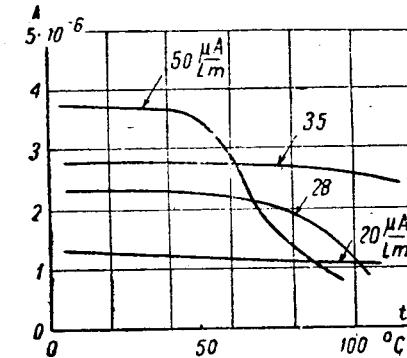


Рис. 37. Изменение чувствительности ЦВ1 с ростом температуры

менте увеличивает газовое усиление и, следовательно, инерцию (рис. 36).

В полосе звуковых частот инерция промышленных газонаполненных фотоэлементов невелика и легко корректируется в фотоусилителе.

В настоящее время разрабатывается более совершенный, чем газовое наполнение, способ усиления фототоков, не зависящий от частоты падающего света, — метод использования динатронного эффекта (вторичной эмиссии).

**Влияние температуры.** Цезиевый сложный фотокатод весьма чувствителен к изменениям температуры. При переменном нагреве до  $50^\circ$  и охлаждении до  $32^\circ$  партии фотоэлементов «Электрозвод» (находящихся под напряжением 240 V и при световом потоке в 0,01 lm) замечалось падение чувствительности до 90% при первых трех циклах. Затем при последующих девяти температурных циклах чувствительность изменялась в пределах от 100 до 180%. Чувствительность фотоэлементов Pressler серии «тонфильм» изменилась в тех же условиях от 50 до 150%, причем высокая чувствительность фотоэлементов обеих фирм наблюдалась как при  $32^\circ$ , так и при  $50^\circ$  без всякой закономерности. Продолжительность цикла была 5—4 h.

Чувствительность вакуумного фотоэлемента падает при нагреве выше  $50^\circ$  (рис. 37).

Чувствительность вакуумных фотоэлементов ЦВ2 после охлаждения их от 10 до  $-50^\circ$  составляла всего лишь 65% от ее начальной величины при  $20^\circ$ . Затем после пребывания фотоэлементов при  $I = 20^\circ$  в течение часа чувствительность их составляла 70%, и после 17 h фотоэлементы пришли в первоначальное состояние. Изменение чувствительности и потенциала зажигания ЦГ2 в зависимости от охлаждения показано на рис. 38. После того как фотоэлементы после охлаждения находились при комнатной температуре  $+20^\circ$  в течение 17 h, чувствительность в среднем была равна 60%, и потенциал зажигания 140% начальных значений (до охлаждения).

Для приема модулированного изучения изменения чувствительности с температурой не имеют существенного значения. Но в схемах реле, срабатывающих при определенной величине светового сигнала, следует предусматривать влияние изменения чувствительности с температурой.

**Срок службы.** Стабильность чувствительности с течением времени работы фотоэлемента, или иначе его большой срок службы, является основным требованием к фотоэлементу при его применении особенно в автоматике. Чувствительность изменяется со временем непрерывной работы по

экспоненциальному закону. Практически после непрерывного воздействия светового потока в 0,05 lm в течение 25—30 h и при рабочем напряжении  $U = 240$  V в фотоэлементах «Электрозвод»

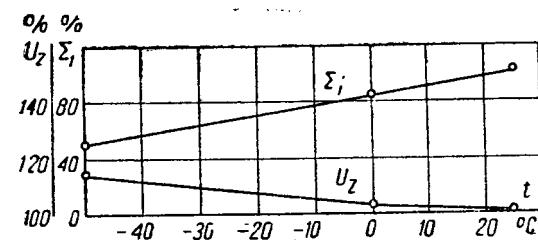


Рис. 38. Изменение чувствительности и потенциала зажигания ЦГ2 при охлаждении

остается всего лишь 20—25% чувствительности; при том же потоке и при рабочем напряжении  $U = 100$  V в фотоэлементах фирмы Pressler после

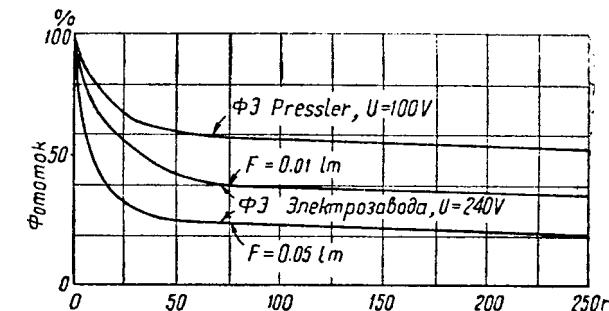


Рис. 39. Срок службы фотоэлементов «Электрозвод» и Pressler ( $F = 0,05$  lm)

50 h остается 50% чувствительности (рис. 39). После 50 h работы чувствительность падает очень медленно (рис. 40).

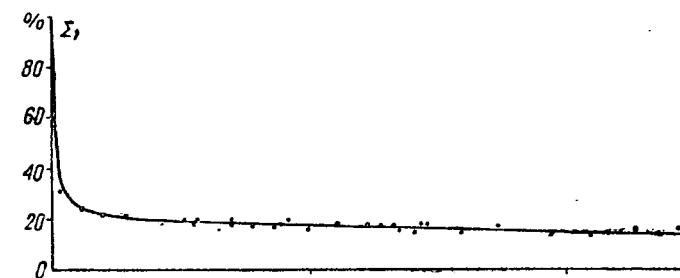


Рис. 40. Срок службы ЦГ1 ( $> 2000$  h;  $U = 240$  V;  $F = 0,1$  lm)

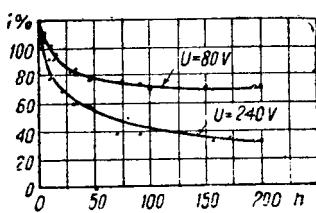


Рис. 41. Срок службы фотоэлементов «Электрозвада» при  $U=240$  V и  $U=80$  V и при одинаковом начальном фототоке  $i=5$   $\mu$ A и  $U_z > 300$  V

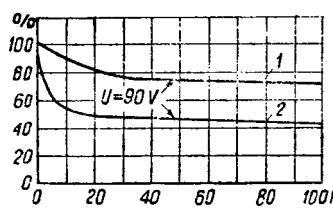


Рис. 42. Срок службы фотоэлемента RCA, Pressler низковольтных фотоэлементов «Электрозвада» ЦГ2-90 при одинаковом начальном фототоке  $i=5$   $\mu$ A:  
 1 — фотоэлементы ЦГ2-90,  $\Sigma_i = 100$   $\mu$ A/lm,  $U_z = 160$  V, 2 — фотоэлементы Pressler и тип 918 RCA,  $\Sigma_i = 93$   $\mu$ A/lm,  $U_z = 150$  V

После тренировки фотоэлементов ЦГ1 — ЦГ5 с чувствительностью 50—70  $\mu$ A/lm и 120—250  $\mu$ A/lm остаток чувствительности в первых больше на 15—18%, чем во вторых, которые больше устают, так как работают при большем газовом усилении.

Таким образом высокочувствительные фотоэлементы менее стабильны, чем низкочувствительные. Во время тренировки чувствительность некоторых экземпляров фотоэлементов в процессе формовки катода сначала увеличивается (10—15 h) и затем падает, стабилизируясь к 50 h.

Для потребителя очень важно, чтобы падение чувствительности во время тренировки или утомление фотоэлемента было бы возможно меньше. Большинство фотоэлектрических устройств рассчитывается на длительную работу и наряду с этим нуждается в достаточно высокой чувствительности фотоэлемента. Утомление фотоэлемента сильно зависит от абсолютной величины рабочего напряжения и его отношения к потенциалу зажигания, от начальной чувствительности фотоэлемента и от величины светового потока или, другими словами, от величины фототока.

Для изучения причин меньшей утомляемости заграничных фотоэлементов относительно наших были поставлены следующие опыты. Фотоэлементы «Электрозвада» ЦГ2 с одинаковыми характеристиками ток — напряжение были поставлены на тренировку на 80 и 240 V при одинаковом начальном фототоке, равном 5  $\mu$ A в каждом фотоэлементе. Результаты показали (рис. 41) меньшее утомление при работе на низком напряжении. Однако практически уменьшение утомления ЦГ1—ЦГ5

при работе их на низком напряжении порядка 80 V не всегда удобно, так как снижение напряжения одновременно уменьшает чувствительность.

Для получения нормальной чувствительности в лаборатории фотоэлементов «Электрозвада» инж. М. И. Беляевым были изготовлены фотоэлементы ЦГ2-90 в колбах и с электродами ЦГ2, имеющие потенциал зажигания около 160 V и среднюю чувствительность при 90 V в 120  $\mu$ A/lm. Результаты испытания их на утомление при  $U=90$  V и  $i=5$   $\mu$ A совместно с фотоэлементами фирмы Pressler и RCA показало (рис. 42), что фотоэлементы «Электрозвада» не уступают по стабильности продукции крупных заграничных фирм при условии надлежащего выбора рабочей точки и потенциала зажигания.

Вакуумные фотоэлементы утомляются в меньшей степени, чем газонаполненные. Срок службы газонаполненных фотоэлементов при правильном их режиме исчисляется тысячами часов (RCA — 25 000 h).

**Предел чувствительности.** На выходе усилителя с большим коэффициентом усиления прослушивается его собственный шум, а если на вход включен фотоэлемент, то и шум фотоэлемента. Причина шума — беспорядочное, тепловое движение электронов в проводнике, а также неравномерность в числе электронов, проходящих через поперечное сечение проводника в малый отрезок времени (дробовой эффект). Это неравномерное движение электронов создает некоторое переменное напряжение, которое и прослушивается на выходе усилителя с большим коэффициентом усиления как «шум усилителя».

В простейшем случае, когда усилитель имеет характеристику идеального полосового фильтра в полосе частот  $f$ , а входное сопротивление  $R$  постоянно и  $T=300$  K, средний квадрат напряжения шума на входе усилителя будет:

$$\bar{E}_m^2 = 1 \cdot 64 \cdot 10^{-20} R \cdot f V^2,$$

где  $R$  в  $\Omega$  и  $f$  в Hz.

Шум входной цепи, включая шум первой лампы, подсчитывается по экспериментальной формуле Джонсона:

$$\bar{E}_m^2 = 1 \cdot 64 \cdot 10^{-20} (R + R_c) f V^2,$$

где  $R_c = 1,5 \cdot 10^5 \frac{i_a}{\mu}$ ;

$i_a$  — анодный ток в mA;

$\mu$  — усиление в динамическом режиме.

Шум вакуумного фотоэлемента представляет собой чистый дробовый эффект. При работе с усилителем, имеющим частотную характеристику, указанную выше, шум дробового эффекта на импедансе  $Z$  подсчитывается по формуле:

$$\bar{E}_m^2 = 31 \cdot 8 \cdot 10^{-20} i z^2 f.$$

Шумы газонаполненных фотоэлементов значительно выше шума вакуумных фотоэлементов и резко возрастают с увеличением газового усиления — более быстро, чем кривая тока статической характеристики фотоэлемента (рис. 43, 44). Величина шума при одинаковом фототоке и различном газовом усилении указана на рис. 45. Высокое газовое усиление, значительно увеличивая собственные помехи, тем самым ограничивает

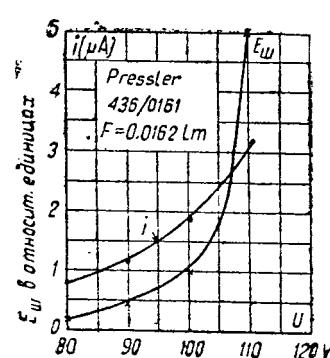


Рис. 43. Шумы фотоэлемента фирмы Pressler

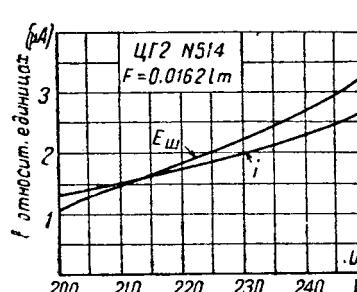


Рис. 44. Шумы фотоэлемента ЦГ2

возможность работы газонаполненного фотоэлемента на слабых сигналах.

Интересно сравнить чувствительность цезиевого фотоэлемента со средним человеческим глазом. Порог чувствительности глаза равен  $2,5 \div 5 \cdot 10^{-9} \frac{\text{erg}}{\text{sec cm}^2}$ , что соответствует  $5 \cdot 10^{-16} \text{W/cm}^2$  или освещенности белым светом ( $T = 5000^\circ \text{K}$ ) в  $5 \div 8 \cdot 10^{-9} \text{lx}$ . Минимальная освещенность, при которой можно видеть невооруженным глазом, приблизительно равна  $(0,97 \div 4,11) \cdot 10^{-7} \text{lx}$ .

Фотоэлемент с усилителем по Лангмюру может отметить абсолютное изменение не меньше чем  $4 \cdot 10^{-11} \text{ свечей}/\text{см}^2$  (около  $1/6$  порога чувствительности глаза). Максимальная мощность по Шротору, которая может быть воспринята фотоэлементом и усиlena, составляет  $1 \cdot 10^{-9} \text{W}$ . Минимальный измеренный с усилителем фототок равен  $1 \cdot 1 \cdot 10^{-16} \text{A}$ . Оптический телефон работает при изменении освещенности  $2 \cdot 10^{-5} \div 4 \cdot 10^{-3} \text{lx}$  (от предела слышимости до нормальной слышимости). Промышленные фотореле срабатывают при минимальном изменении освещенности на окошке от 0,5 до 320 lx.

**Коэффициент полезного действия.** Фотоэлемент часто называют прибором для превращения световой энергии в электрическую. Надо сказать, что с энергетической точки зрения даже лучшие современные кислородно-цезиевые фотоэлементы представляются чрезвычайно несовершенными приборами. Чувствительность идеального фотоэлемента по Зворыкину  $67 \text{ mA/lm}$ . Следовательно, к. п. д. современного фотоэлемента ( $\Sigma_i = 100 \mu\text{A/lm}$ ) составляет всего лишь

$$\eta = \frac{100 \cdot 10^{-6} \cdot 100\%}{67 \cdot 10^{-3}} = 0,15\%.$$

Эта незначительная величина показывает, насколько еще малы успехи техники в этой области. Малая величина к. п. д. фотоэлементов не мешает их самому широкому внедрению во все отрасли техники благодаря развитию техники усиления малых токов. Фотоэлементы «Электрозводства», несмотря на ряд дефектов, могут быть использованы не только для работы с модулированным светом, но и в фотореле, работающих на принципе прерывания светового луча, и в других фотоэлектрических приборах.

Резюмируя вышеизложенное, можно сказать, что фотоэлементы «Электрозводства» имеют следующие особенности по сравнению с фотоэлементами заграничных фирм.

1. Утомляемость слишком велика. Нельзя считать прибор удовлетворительно работающим, если остаток его чувствительности после суточной работы составляет всего лишь 20—25% (при  $F=0,05 \text{ lm}$ ).

2. Разброс чувствительности в рабочей точке у фотоэлементов всех типов ЦГ1—ЦГ5 недопустимо велик. Потребителю неудобно работать с разнородной продукцией.

3. Газовое усиление у многих экземпляров ЦГ1—ЦГ5 настолько велико, что шумы резко возрастают до степени полной непригодности таких фотоэлементов в звуковом кино.

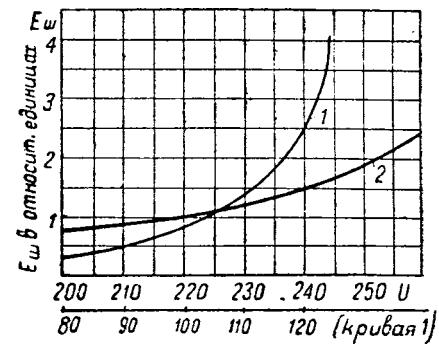


Рис. 45. Шумы фотоэлемента при постоянном фототоке  
 $i = 1,05 \mu\text{A}$ , 1 — фирмы Pressler, 2 — ЦГ2 № 514 «Электрозводства»

4. Большая крутизна статической характеристики этих же фотоэлементов делает их мало-пригодными (при  $U = 240 \text{ V}$ ) в ряде практических схем.

5. Велико их изменение чувствительности при небольших изменениях окружающей температуры.

6. Темновые токи в несколько раз больше, чем у заграничных фотоэлементов: тем самым ограничивается возможность работы на малых сигналах.

7. Неравномерность чувствительности по катоду велика.

8. Форма электродов ЦГ1—ЦГ5 неудачна, так как образуются «слепые» или малочувствительные пятна.

9. Сферическая форма колбы устарела; она значительно снижает интегральную чувствительность фотоэлементов вследствие потери света при прохождении его через стекло под углом.

10. Ассортимент выпускаемых «Электрозводом» фотоэлементов (5 типов) явно недостаточен; крупные фирмы за границей изготавливают цезиевые фотоэлементы десятками типов, специализируя их по назначению.

Достоинством фотоэлемента «Электрозводства» является их большая чувствительность к инфракрасному свету.

Худшие характеристики наших фотоэлементов объясняются неверным выбором их рабочего напряжения ( $U = 240 \text{ V}$ ). Низковольтные ( $U = 90 \text{ V}$ ) фотоэлементы менее утомляются, так как скорости положительных ионов меньше, и бомбардировка фотокатода ими менее разрушительна. Разброс чувствительности у низковольтных фотоэлементов ( $U = 90 \text{ V}$  и  $U_z = 160 \text{ V}$ ) невелик, так как в этом случае происходит сдвиг в правую, более пологую часть кривой Пашена, где изменение давления аргона менее влияет на потенциал зажигания, чем в левой, более крутой части этой же кривой.

Несмотря на то, что газовое усилие низковольтных фотоэлементов несколько меньше, в конечном итоге оно выгоднее потребителю, так как в большинстве случаев фотоэлектрические устройства рассчитываются на длительную эксплуатацию, когда важна не начальная чувствительность фотоэлемента, а чувствительность его после тренировки, которая в среднем

у низковольтных фотоэлементов выше. Темновые токи низковольтных фотоэлементов ( $U = 90$  V) значительно меньше и т. д.

При рассмотрении срока службы были описаны опыты, которыми доказано, что фотокатоды «Электрозвада» не менее стабильны, чем заграничные, при условии надлежащего выбора режима работы фотоэлемента.

Насегодня, однако, «Электрозвад» не выпускает низковольтных фотоэлементов, хотя они имеют, помимо вышеуказанных, ряд таких преимуществ, как удобство их применения в автоматике для измерительных целей, для передвижных и полевых установок и т. п.

Неправильный выбор рабочего режима, ухудшающий все характеристики фотоэлемента, получился в результате пренебрежения в ВЭИ и

на «Электрозваде» массовыми испытаниями слабого учета опыта заграницы, оторванности работы физиков от конструкторской работы и от практических требований к приборам при их применении.

Производство нужнейших изделий — фотоэлементов — фактически забыто Главэнергопромом. Изготовление фотоэлементов считается второстепенным делом и поручено оно подсобному цеху «Электрозвада».

Интересы промышленности и обороны страны требуют радикального организационного и технического улучшения производства фотоэлементов в третьей пятилетке. Необходима усиленная работа как по отысканию оптимального режима работы фотоэлемента, так и по улучшению качества самих фотокатодов.

## Автоматическая асинхронная гидроэлектростанция Дроп-Плен (США)

М. П. Суслов

Институт Гидромашиностроения

За последние пять лет в США, а также в Европе получили распространение автоматические гидростанции с асинхронными генераторами. Мощность их колеблется от 100 до 7000 kVA. Гидростанции с синхронными генераторами малой мощности не всегда могут быть сооружены ввиду дороговизны основного автоматического оборудования и сложности схемы. Применение асинхронных генераторов сильно снижает стоимость основного оборудования, так как схема их автоматического управления гораздо проще и не требует в большом количестве автоматической аппаратуры.

Асинхронные станции обходятся дешевле благодаря отсутствию целого ряда элементов оборудования, крайне необходимого для синхронных автоматических гидростанций. Для асинхронных гидростанций не нужны следующие аппараты: 1) регулятор скорости, 2) автоматический синхронизатор, 3) регулятор напряжения, 4) возбудитель постоянного тока и регулировочное устройство к нему, 5) устройство для гашения поля генератора.

Наряду с этим автоматические асинхронные гидростанции также обладают и целым рядом недостатков, которые до некоторой степени не позволяют осуществлять их в любых условиях. К недостаткам можно отнести следующее: 1) невозможность изолированной работы асинхронной установки без мощной синхронной сети; 2) мощность асинхронной установки не должна превышать одной десятой мощности синхронной станции.

Несмотря на эти недостатки, все же эти станции в некоторых случаях имеют ряд упомянутых выше преимуществ перед синхронными.

В данной статье мы хотим описать одну автоматическую асинхронную гидростанцию, построенную в США, которая по своей простоте, несложности аппаратуры и дешевизне представляет большой интерес. Эту схему возможно применить в некоторых случаях и в наших установках, тем более, что аппаратуру для них можно получить на ХЭМЗ.

Гидроэлектрическая станция Дроп-Плен расположена примерно в 12 mil к северо-западу от г. Якима, штат Вашингтон. Эта станция построена на головном канале, подающем воду для станции Нашес.

На станции установлена одна турбина вертикального типа Френсиса, мощностью в 1900 л. с., напор 16 м, асинхронный генератор 1750 kVA, 2300 V.

Станция Дроп-Плен соединена с главными линиями станции Нашес высоковольтной 66-kV линией, управляемой на станции Нашес.

Кроме этой линии, от станции Нашес идут еще две: одна для питания собственных нужд станции Дроп-Плен, другая — для связи. Линия связи, состоящая из двух проводов, подает сигнал для зажигания сигнальной лампы на станции Нашес, когда станция Дроп-Плен не возбуждена.

Станция пущена в эксплуатацию в 1927 г., работает все время нормально и из-за автоматической аппаратуры аварий не было.

Схема станции представлена на рис. 1, там дано описание автоматической аппаратуры.

Положение до пуска. Магнитный пускатель включен, его вспомогательный контакт *b* отключен. Реле 4 отключено. Конечный выключатель включен. Реле 5 отключено и его контакт *b* зачищен. Магнитные пускатели 6 и 7 отключены.

ле 1, 10 и 13 отключены. Верхний предельный контакт поплавкового выключателя 3 замкнут. Рубильник 11 включен. Масляный выключатель К-22 включен. Контакты а выключены. Трансформатор 12 без напряжения. Трансформатор собственных нужд находится под напряжением, и питание автоматической аппаратуры обеспечено.

**Пуск станции.** Дежурный на станции Нашес включает масляный выключатель К-22, установ-

образом катушка магнитного пускателя 7 включается и включает мотор направляющего аппарата турбины. Аппарат начинает медленно открываться. Одновременно катушка магнитного пускателя получает питание по второй цепи через свой контакт, второй контакт предельного выключателя 9 и фазу 1. Это вторичное питание предусмотрено для того, чтобы избежать вибрации пускателя в случае колебания поплавкового контакта. При включении пускателя 7 включается

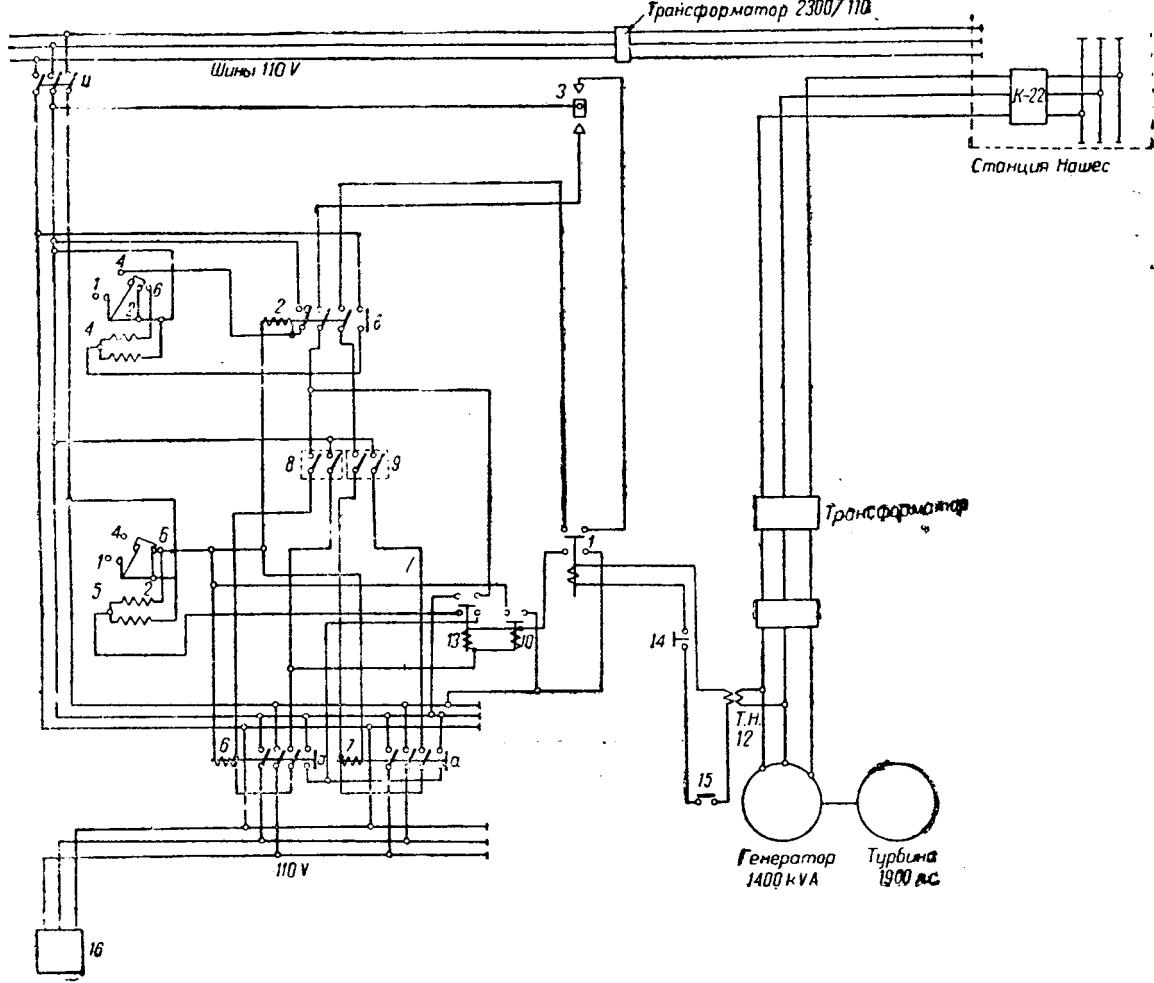


Рис. 1. Схема станции Дроп-Плен.

1 — главное реле, 2 — трехполюсный магнитный пускатель на 110 В с одной парой контактов (нормально замкнуты), 3 — поплавковый выключатель с двумя парами замыкающихся контактов: один в верхнем предельном положении, другой — в нижнем предельном положении, 4 — моторное реле времени на 110 В до 30 сек с двумя парами контактов, 5 — моторное реле времени на 110 В с двумя парами контактов, 6 и 7 — трехполюсные магнитные пускатели на 110 В с одним вспомогательным контактом, 8 — двухполюсный предельный выключатель на 110 В, 9 — двухполюсный предельный выключатель на 110 В, 10 — вспомогательный реле на 110 В с одной парой контактов (нормально разомкнутые), 11 — трехполюсный ручной выключатель на 500 В 60 А, 12 — однотактный трансформатор напряжения 230/110 В, 50 В, 13 — вспомогательное реле на 110 В с двумя парами контактов, одна пара нормально замкнуты, другая пара разомкнуты, 14 — кнопка для остановки станции (нормально замкнута), 15 — центробежный контактор с одной парой контактов, размыкающихся при чрезмерной скорости, 16 — короткозамкнутый мотор на 1 л. с. для приведения в действие направляющего аппарата турбины. Вся аппаратура на переменном токе 110 В

ленный на этой станции, и тем самым подается напряжение на асинхронный генератор.

Трансформатор напряжения 12, получая напряжение, возбуждает реле 1, которое замыкает верхние свои контакты.

Так как в аванкамере горизонт воды достаточен для работы станции, то поплавок 3 имеет предельные верхние контакты замкнутые, благодаря чему образуется следующая цепь: фаза 2, верхние предельные контакты поплавка 3, контакты реле 1, контакт магнитного пускателя 2, предельный выключатель 9, катушка магнитного пускателя 7, реле 5 (контакт б) и фаза 1. Таким

его дополнительный контакт а, который подает напряжение на моторное реле 5 по следующей цепи: фаза 2, контакт а, нижние контакты реле 13, катушка реле 5 и фаза 1.

Через полторы секунды реле 5 начинает свою работу и разрывает контакты б, что прекращает питание магнитной катушки 2 и 7. Питающая цепь реле 5 прерывается и реле 5 возвращается в первоначальное положение (контакт б реле 5 снова замыкается).

Как только контакт 2 выключается, его вспомогательный выключатель б замкнется и тем самым реле 4 получает напряжение. Через проме-

жуток времени в 30 сек реле 4 срабатывает, замыкает контакт 4 и катушка магнитного пускателя 2 оживляется током и включает свои контакты. При включении катушки разрывает контакт *b*, прекращая питание реле 4. Реле 4 возвращается в первоначальное положение.

Если поплавковый выключатель все еще находится в верхнем положении, т. е. верхние его контакты замкнуты, вышеописанная операция будет продолжаться и повторяться несколько раз до тех пор, пока верхние контакты поплавка не разомкнутся, после чего нагрузка на генератор остается без изменения.

Турбина начинает постепенно срабатывать воду верхнего бьефа до определенного горизонта.

Достигнув предельного нижнего положения горизонта воды в аванкамере, поплавок замкнет нижние контакты, образуя следующую цепь: фаза 2, нижние контакты поплавка 3, контакт магнитного пускателя 2, предельный выключатель 8, катушка магнитного пускателя 6, контакт 6 реле 5 и фаза 1.

Магнитный пускатель 2 включится, и мотор направляющего аппарата медленно в течение 1,5 сек закрывается.

Одновременно с этим замыкается дополнительный контакт пускателя 6, подавая напряжение от фазы 1 через второй контакт предельного выключателя 8. Это необходимо для предупреждения вибрации пускателя 6 в случае колебания поплавка 3.

Кроме этого, замыкается контакт *a* пускателя 6, образуя новую цепь: фаза 2, контакт *a*, нижний контакт реле 13, моторное реле времени 5 и фаза 1. Реле 5, получив напряжение, через 1,5 сек срабатывает, разорвет контакт *b* и прекратит питание катушек пускателей 2 и 6. Магнитные пускатели 2 и 6 отключаются, реле 5 возвращается в первоначальное положение.

Магнитный пускатель 2, выключившись, замыкает свой контакт *b*, который оживит реле 4. Реле 4 через 30 сек включит свой контакт 4, который оживляет током катушку магнитного пускателя 2, одновременно разрывается контакт *b*, выключая реле 4 (возвращается в свое первоначальное положение).

Магнитный пускатель 2 включается, и далее процесс проходит так же, как было описано выше. Этот процесс продолжается до тех пор, пока

или горизонт воды поднимется и разорвутся нижние контакты поплавка 3 или пока направляющий аппарат не закроется до положения холостого хода и предельный выключатель выключит его.

В первом случае турбина работает с определенной нагрузкой, накапливается вода в аванкамере до момента замыкания верхних контактов поплавка 3, после чего нагрузка генератора начинает снова увеличиваться; во втором случае турбина вращается вхолостую.

Таким образом гидростанция работает автоматически, в зависимости от изменения горизонта воды в верхнем бьефе.

**Нормальная остановка.** Для нормальной остановки диспетчер станции Нашес выключает масляный выключатель К-22, отключая возбуждающий ток асинхронного генератора.

Реле 1, не имея напряжения, выключается и включает своими нижними контактами два вспомогательных реле 10 и 13, образуя следующую цепь: фаза 2, предельный выключатель 8, обмотки реле 10 и 13, нижний контакт реле 1 и фаза 1.

Реле 10 и 13 включаются и образуют следующую цепь: фаза 1, контакт реле 10, катушка пускателя 6, предельный выключатель 8, верхний контактор реле 13 и фаза 2. Таким образом, магнитный пускатель 6 получает питание, минуя реле 5. Мотор закрывает направляющий аппарат турбины до тех пор, пока его не выключит предельный выключатель 8.

Для выключения агрегата вручную предусмотрена кнопка 14, а при чрезмерной скорости размыкается контакт центробежного контакта, включенный последовательно с кнопкой 14. Остановка происходит так же, как и при выключении масляного выключателя на станции Нашес.

Как видно из приведенной схемы, она очень проста и имеет простое автоматическое оборудование. Станция Дроп работает абсолютно без персонала; только один раз в неделю приходит инспектор для осмотра аппаратуры и смазки подшипников.

Вышеприведенная схема может быть с успехом применена на некоторых гидростанциях в Союзе, что следует учесть при составлении плана третьей пятилетки по гидростроительству. Достоинство этой схемы: простота и экономичность.

## Трубчатые разрядники для защиты от грозовых аварий

DEION LIGHTNING ARRESTERS

М. М. Акодис

Высоковольтная лаборатория Донэнерго

КАК известно, фибровые разрядники, чаще называемые у нас трубками Торока или дейонными разрядниками, были предложены [1, 2] в 1930/31 г. Торок предложил в применявшемся ранее для защиты линий от грозовых аварий стреляющем предохранителю изъять плавкую вставку и оставить внутри трубы искровой промежуток, который пробивается волной перенапряжения, таким образом он сделал этот разрядник многократным.

Примерно в таком же виде, в каком он был выпущен в 1931 г., фирма Вестингауз продолжает производить эти разрядники до настоящего времени [3]. Несколько позднее подобные разрядники стала выпускать фирма GEC [4].

Произведенное автором исследование показало, что в разрядниках американской конструкции недостаточно рационально используются дугогасящие свойства фибры. Более рациональным использованием этих свойств можно значительно увеличить диапазон выключаемых разрядником токов и, что еще важнее, значительно понизить его разрядное напряжение, тем самым сделав разрядник пригодным для защиты подстанционной изоляции, на желательность чего неоднократно указывалось. Рядом специальных устройств можно достигнуть удовлетворительной защиты не только изоляции нормальной электрической прочности, но даже значительно ослабленной.

**Принцип действия.** Рассмотрим процесс гашения дуги в разряднике, открытом с двух сторон, подобном выпускаемому фирмой Вестингауз для напряжения 69 kV и выше. Фибровый разрядник (в дальнейшем мы его будем называть трубчатым разрядником) состоит из фибровой или фибробакелитовой трубы (рис. 1), внутрь которой вставлены электроды той или иной формы. Между линией и разрядником обычно оставляется искровой промежуток, предохраняющий разрядник от постоянного воздействия напряжения, так как при длительном пребывании под напряжением фибра обугливается токами утечки и теряет свои изолирующие свойства. При падении на разрядник волны импульса с амплитудой, достаточной для перекрытия наружного и внутреннего промежутков разрядника, происходит разряд, вслед за которым в трубке устанавливается дуга короткого замыкания. Ввиду высокой температуры дуги наблюдается интенсивное обжигание фибры, сопровождаемое бурным газообразованием. Благодаря газообразованию, сопровождаемому резким возрастанием давления, возникает движение газов в трубке по направлению к выходам и притом с сильным завихрением. За-

вихрение приводит к интенсивному перемешиванию газов, выделяемых фиброй, с ионизированными газами дуги, расщепляет дугу на очень тонкие нити, окруженные со всех сторон сравнительно холодным, неионизированным газом. Расщепление дуги на нити в процессе быстрого вихревого движения всей массы газов приводит к более усиленной деионизации дугового пространства благодаря поглощению энергии дуги фиброй. В момент прохождения 50-периодного тока через нулевое значение ионизация резко падает, почти прекращаясь, деионизация же продолжается. В результате, электрическая прочность дугового промежутка быстро возрастает, и дуга не возникает вновь, если скорость нарастания электрической прочности дугового промежутка будет больше, чем скорость нарастания напряжения на дуге.

**Основные факторы, определяющие параметры разрядника.** Трубчатый разрядник должен иметь разрядное напряжение ниже чем применяемой изоляции, что задает максимальную длину внутреннего искрового промежутка — расстояние между электродами. Это обстоятельство затрудняет разработку разрядников, особенно для напряжений 20—35 kV, так как требует применения сравнительно коротких искровых промежутков в трубке и, следовательно, достижения больших градиентов гашения. Таким образом основным фактором, определяющим возможность изготовить разрядник для защиты изоляции данного напряжения, является градиент гашения дуги. Как было указано Слепяном [5], градиент гашения дуги в фибровой трубке, открытой с двух сторон, в основном, определяется следующими двумя факторами:

Величиной тока — чем больше ток, тем больше энергии выделяется в дуге (при прочих равных условиях), тем интенсивней газообразование, большее давление, завихрение газов, интенсивней идет замена ионизированных газов дуги неионизированным, выделяемым фиброй, интенсивней деионизация дугового промежутка. Усиление деионизации повышает сопротивление

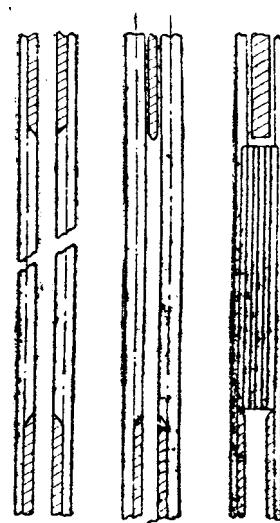


Рис. 1

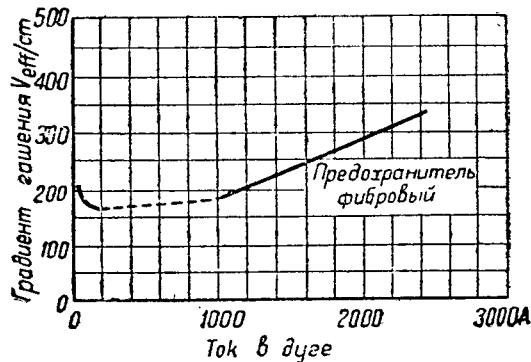


Рис. 2. Зависимость градиента гашения от отключаемого тока для фиброного предохранителя с внутренним диаметром 16 мм и при длине трубы 100 мм

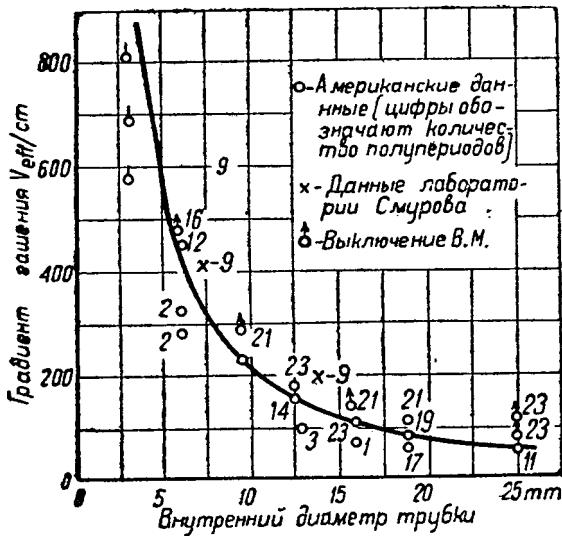


Рис. 3. Влияние внутреннего диаметра фиброной трубы разрядника на градиент гашения

дуги, благодаря чему увеличивается напряжение на дуге. Все это сопровождается увеличением градиента гашения (рис. 2).

Вторым фактором, определяющим градиент гашения разрядника, является внутренний диаметр фиброной трубы. Чем меньше внутренний диаметр трубы, тем сильнее воздействие дуги на фиброну и тем интенсивнее происходит, следовательно, процесс деионизации дуги. Уменьшение внутреннего диаметра увеличивает градиент гашения. Зависимость градиента гашения от внутреннего диаметра фиброной трубы для тока 450 А и открытой с обеих сторон фиброной трубы длиной 10 см, по данным Слепянина и Денольта [5], приведены на рис. 3. Там же нанесены данные, полученные в лаборатории им. проф. Смуррова, обе последние кривые получены Слепяниным для цели с большой частотой собственных колебаний, так как ток к. з. ограничивался реакторами.

Исследования Слепянина производились над трубками одинаковой длины, равной 10 см. Как показывает опыт, изменение длины фиброной трубы также влияет на градиент гашения.

Таким образом третьим фактором, определяющим градиент гашения в трубке, открытой с обеих сторон, является длина разрядника. Пови-

димому, это объясняется тем, что с увеличением длины трубы выход газов затрудняется, возрастает давление, увеличиваются завихрения, деионизация усиливается. Кроме того, с увеличением длины трубы один и тот же объем газов при вылете из трубы продолжает действовать на большом расстоянии, что способствует более полной замене ионизированных газов дуги менее ионизированными газами; выделяемыми стенками фиброной, и, следовательно, также увеличивает деионизацию дугового промежутка. Таким образом с увеличением длины разрядника градиент гашения также возрастает. Установить количественную зависимость изменения градиентов гашения от длины при испытаниях в сети чрезвычайно затруднительно, так как это требует изменения напряжения без заметного изменения частоты собственных колебаний. При испытаниях в сети изменение напряжения возможно лишь при переходе от одного напряжения к другому (от 6,6 кВ к 35 или 110 кВ), при этом резко меняется скорость восстановления напряжения, что изменяет условия гашения дуги [6, 7].

С точки зрения эксплоатации наилучшим решением явилось бы создание такого разрядника, который, обладая достаточно хорошей защитной характеристикой, выключал бы все токи при всех возможных скоростях восстанавливающегося напряжения. В настоящее время создать такой разрядник еще не удалось, поэтому фирмы, выпускающие разрядники, вынуждены давать ряд ограничений для его применения. В частности, указывать для него определенный диапазон токов.

**Влияние конструкции на характеристики.** Как показали исследования, диапазон токов, выключаемых разрядником, равно как и все его характеристики, чрезвычайно сильно зависят от конструкции. В предыдущей главе были рассмотрены основные факторы, определяющие дугогасящую способность разрядника, открытого с обеих сторон. Улучшение характеристик разрядника можно достигнуть закрытием одного его конца.

Рассмотрим подробно влияние этого фактора.

В разряднике, закрытом с одного конца (рис. 1, б), весь поток газов направляется в одну сторону, в то время как в трубке, открытой с двух сторон (рис. 1, а), поток газов делится на части, выходящие в разные стороны. Таким образом закрытый с одного конца разрядник по условиям деионизации искрового промежутка приближается к условиям работы, открытого с обеих сторон разрядника удвоенной длины, включенного на удвоенное напряжение, следовательно, градиент гашения у такой трубы должен быть несколько выше за счет третьего фактора из перечисленных в предыдущей главе. Однако достигаемое этим увеличение градиента гашения невелико.

Проведенное в высоковольтной лаборатории Донэнерго исследование процесса гашения дуги в трубчатом разряднике показало, что градиент гашения в разряднике, закрытом с одного конца, может быть значительно увеличен устройством большого резервуара для газов вокруг электрода со стороны закрытого конца (рис. 4 и 5). Последнее достигается либо удлинением трубы и соот-

ветствующим удлинением цилиндрического электрода, входящего в трубку со стороны закрытого конца (рис. 4), либо устройством резервуара в металлическом наконечнике на закрытом конце разрядника (рис. 5).

Влияние резервуара, образуемого вокруг электрода, на гашение дуги может быть объяснено следующим образом: во время горения дуги в трубке возникает большое давление, которое может достигнуть 400—500 ат и выше, благодаря чему резервуар наполняется газом. К концу полупериода, когда ток приближается к нулевому значению, давление в трубке падает, так как уменьшается обжиг фибры и газообразование, а выход газов через открытое отверстие продолжается, очевидно, что и давление в резервуаре также уменьшается, газ, скопившийся там, выходит наружу, проходя через свою область дуги. Газ, находящийся в резервуаре, вне дуги, обладает значительно большей электрической прочностью, чем газы, заполняющие дуговое пространство (промежуток внутри разрядника между электродами). Благодаря этому к концу полупериода дуга подвергается воздействию продольного газового дутья газами из резервуара, что способствует ее интенсивной деионизации в момент, непосредственно предшествующий прохождению тока через нулевое значение.

В трубчатом разряднике без резервуара давление в дуговом промежутке, возрастающее с увеличением тока, при падении тока также быстро падает. Таким образом в момент, близкий к максимуму тока, деионизация происходит интенсивно и давление в разряднике велико. В момент приближения тока к нулевому значению давление резко падает, также приближаясь к нулевому значению, следовательно, интенсивность газового дутья и скорость деионизации также резко уменьшаются. Таким образом во время прохождения тока через нулевое значение и в период, непосредственно предшествующий ему, когда интенсивность деионизации определяется, погаснет ли дуга или произойдет повторение зажигания, деионизация очень слаба, значительно уступая таковой во время максимума тока.

Наличие резервуара, как выше указывалось, приводит к запаздыванию спада давления, способствуя сохранению интенсивного газового дутья в момент, непосредственно предшествующий прохождению тока через нулевое значение. Интенсивное газовое дутье в свою очередь поддерживает интенсивную деионизацию, как перед прохождением тока через нулевое значение, так и в самый этот период. Благодаря этому прочность дугового промежутка после исчезновения тока быстрее восстанавливается, разрядник в состоянии выключить большее напряжение.

Очевидно, что изменение давления в разряднике после того, как ток достиг максимального значения, зависит не только от процесса исчезновения газов, но и от процесса газообразования. Если, по мере спадания тока, после достижения им максимального значения, сопровождающегося уменьшением выделения энергии в разряднике будет резко уменьшаться газообразова-

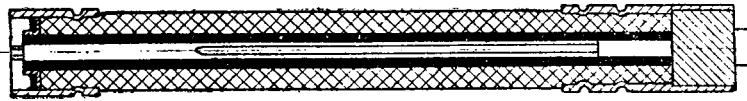


Рис. 4

Дополнительный электрод

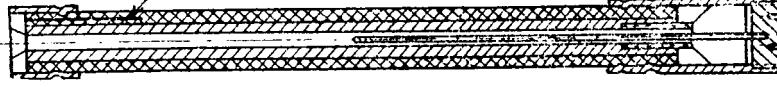


Рис. 5

ние, давление будет падать быстро, и деионизация в момент, предшествующий прохождению токов через нулевое значение, будет слаба. Если же при спадании тока разложение фибры и газообразование будут оставаться интенсивными, давление и газовое дутье будут падать медленнее, деионизация, в момент прохождения тока через нулевое значение, будет оставаться интенсивной и выключаемое напряжение будет выше.

Таким образом качество фибры, ее состав, пропитка, обработка также могут влиять на дугогасящие свойства разрядников.

Простейшим образом разрядник с резервуаром может быть устроен такой же конструкции, как и обычный трубчатый разрядник, закрытый с одного конца. Применением достаточной длины трубок можно получить внутри фибровой трубки, между цилиндрическим электродом, глубоко входящим внутрь трубки, и стенками фибры (рис. 4), резервуар объемом, в несколько раз превышающим объем дугового промежутка.

Создание внутри фибровой трубки вокруг электрода необходимого резервуара (в несколько раз превышающего объем дугового промежутка) затруднительно, а в некоторых случаях и невозможно. Лучших результатов удается достичь устройством специального резервуара в наконечнике подобно тому, как это изображено на рис. 5. Следует отметить, что небольшой резервуар имеется и в американских разрядниках, закрытых с одного конца, благодаря наличию цилиндрического электрода, входящего внутрь трубы со стороны закрытого конца (см. рис. 1, б), вызванного необходимостью обеспечить пробой внутри трубы, а не по внешней поверхности. Однако размер этого резервуара слишком незначителен, чтобы заметно сказаться на дугогасящих свойствах разрядника, составляя незначительную часть от объема дугового промежутка. Чтобы резервуар заметно сказался, необходимо иметь объем его, значительно превышающий объем дугового промежутка.

Достигнутое увеличение градиента гашения, значительно превышающего градиент гашения в американских разрядниках, дает возможность резко уменьшить длину искрового промежутка внутри трубы. Уменьшение искрового промежутка приводит к уменьшению его разрядного напряжения, одновременно значительно увеличивая верхний предел токов, выключаемых разрядником, так как уменьшается давление в трубке.

**Методика испытаний.** Очевидно, для сравнения дугогасящих свойств разрядников необходимо

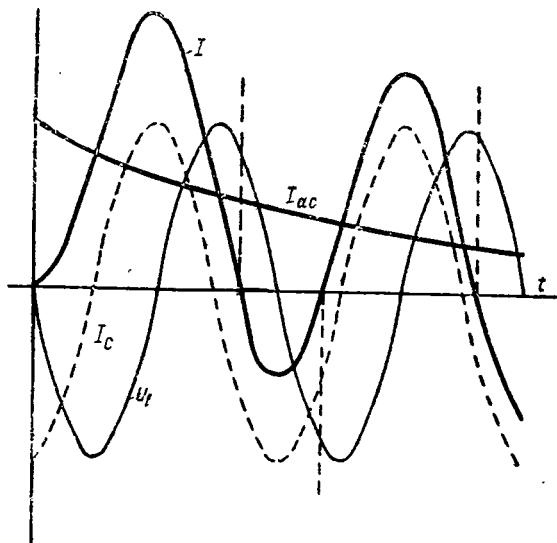


Рис. 6. Влияние постоянной составляющей тока на амплитуду восстанавливающегося на дуге напряжения (мгновенные значения напряжения при прохождении тока через нулевое значение отмечены пунктиром)

— полный ток,  $I_c$  и  $I_{ac}$  — соответственно, симметричная и постоянная составляющие,  $U_c$  — напряжение

проводить испытания одинаковыми токами и при разных скоростях восстанавливающегося напряжения.

Следует отметить, что при испытаниях в сети оба эти фактора не остаются неизменными, а меняются от опыта к опыту. Так как гашение дуги в разряднике происходит в один полупериод, — полная величина тока сильно зависит от величины постоянной составляющей тока к. з., т. е. от фазы напряжения в момент начала к. з. и места к. з. в сети. Обычно при к. з. сдвиг фаз между симметричным значением тока и напряжением близок к  $90^\circ$ . При наличии в токе постоянной составляющей кривая полного тока сдвигается по отношению к напряжению, следовательно, в момент прохождения тока через нулевое значение амплитуда напряжения может иметь любое значение (меньшее максимального), в зависимости от величины постоянной составляющей тока (рис. 6). Скорость восстановления напряжения на дуге пропорциональна амплитуде напряжения в момент прохождения тока через нулевое значение (пренебрегая напряжением на дуге), таким образом наличие постоянной составляющей в токе к. з. может сильно понизить скорость восстановления напряжения, что облегчает гашение дуги. Испытание разрядников необходимо производить при отсутствии постоянной составляющей тока к. з., так как это условие в эксплуатации может иметь место.

Значение постоянной составляющей тока может быть при испытаниях сильно ограничено

включением последовательно с разрядником незакороченного искрового промежутка, пятидесятипериодное разрядное напряжение которого близко к амплитуде напряжения сети (рис. 7). В этом случае к. з. может начаться только после пробоя внешнего промежутка, т. е. в момент, когда напряжение близко к максимальному значению, следовательно, значение постоянной составляющей тока к. з. мало, при этом скорость восстановления напряжения также будет колебаться в сравнительно узких пределах. При отсутствии же незакороченного искрового промежутка первого полупериода может колебаться в пределах от 1:4 и даже более (от 0,2—0,3 до 1,5—1,6 величины симметричного значения тока к. з.). Колебание скорости восстановления напряжения может быть также велико.

Чтобы избежать ошибок в оценке разрядника, вследствие этого при большом значении постоянной составляющей гашение дуги разрядников данного типа в данной схеме проверялось не менее 10 раз, что давало нам уверенность в надежности гашения дуги и разрядников в данной схеме.

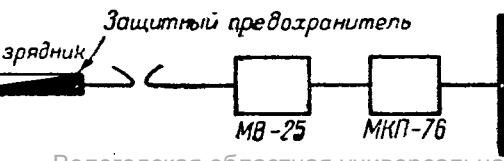
Отказ в гашении дуги в данной схеме достаточно проверить 2 раза.

Сравнение различных типов разрядников сильно затрудняется неоднородностью изготавливаемой у нас фибры.

Чтобы избежать случайных результатов, вносимых неоднородностью фибры при сравнении дугогасящих свойств различных типов разрядников, испытание каждого типа производилось не менее чем над тремя образцами (иногда над 5—6 образцами). Следует иметь в виду, что даже при совершенно одинаковой фибре и тождественных токах и скоростях восстанавливающегося напряжения гашение дуги в разряднике (так же как и разряд в любом искровом промежутке) будет зависеть от ряда случайных причин, так что даже при соблюдении указанных предосторожностей надежное гашение дуги может быть установлено лишь после многократных испытаний.

Установленный в сети разрядник должен обеспечить гашение дуги в сравнительно широком диапазоне токов. Так как с уменьшением величины тока градиент гашения уменьшается, при выборе длины искрового промежутка внутри разрядника необходимо исходить из условий надежного гашения дуги при нижнем пределе токов. По мере работы разрядника его внутренний диаметр благодаря износу фибры увеличивается, что ухудшает дугогасящие свойства разрядника и одновременно способствует понижению давления в нем во время работы. Износ фибры тем больше, чем больше величина тока, проходящего через разрядник. Таким образом при испытании типа разрядника, предназначенного для установки в сети, необходимо испытать разрядник сначала токами, близкими к верхнему пределу, для проверки его механической прочности и износа фибры, после чего проверить, может ли разрядник с увеличенным внутренним диаметром — после испытаний большими токами — надежно гасить дугу при нижнем пределе токов.

Для зажигания дуги в разряднике при испытаниях искровой промежуток



Вологодская областная универсальная научная библиотека  
www.booksite.ru

внутри трубы закорачивался тонкой проволокой диаметром 0,05, 0,08 mm, которая очень быстро расплавлялась. На гашение дуги величина плавкой вставки не сказывается ввиду ее ничтожно малого сечения. С целью

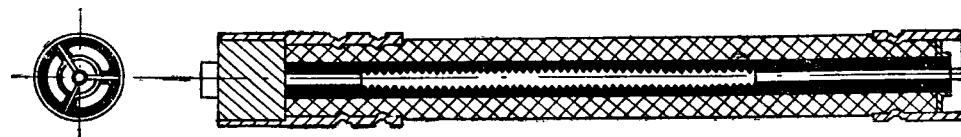


Рис. 8. Разрядник без резервуара

избежать аварии в сети в тех случаях, когда испытуемый разрядник короткое не включал, последовательно с разрядником включался стреляющий предохранитель (рис. 7), конструкция которого была проверена заранее. Плавкая вставка предохранителя подбиралась такого сечения, что плавление ее происходило в 4—5 полупериодов и к. з. происходило через 5—7 полупериодов. Так как при больших токах разрядник должен гасить дугу в один полупериод, максимально возможная длительность которого 4—5 полупериодов достаточна для испытания. При испытании на малые токи плавкая вставка подбиралась такой, чтобы плавление ее происходило в 8—10 полупериодов, так как при токах, близких к нижнему пределу, допустимо гашение в 2—3 полупериода. На случай отказа в работе предохранителя последовательно с ним были включены два масляных выключателя, выключивших к. з. первый — через 0,15—0,18 sec с момента его возникновения, второй приблизительно через 0,5 sec.

**Испытания.** Сравнение дугогасящих свойств различных разрядников при испытаниях в 110 kV системе Донэнерго на Константиновской подстанции в апреле-мае 1935 г. приведено в табл. 1. Испытанию подвергались разрядники, открытые с обеих сторон, закрытые с одной стороны как с резервуаром, так и без него.

Таблица 1  
Сравнение гасящих свойств различных типов 110-kV  
трубчатых разрядников

№ п/п	Дата испытаний	№ трубы	Внутренний диаметр фибры, mm	Длина электрода, mm	Расстояние между электродами, mm	Ток, A	Напряжение, kV	Градиент гашения, kV/cm	Число полупериодов
1	2/V	27 <sup>a</sup>	15—5	—	700	2825—2710	60	0,85	3
2	2/V	27 <sup>a</sup>	17	—	700	2712	59	0,84	4
3	13/V	88	16—17	—	700	2600—2373	55	0,78	8
4	13/V	50 <sup>b</sup>	11,5	—	355	2881—2373	57	1,6	4
5	13/V	50 <sup>b</sup>	13,5	—	353	1977—2880	55	1,56	12
6	27/IV	28	10	350	240	1700	64	2,67	1
7	21/IV	23	10	346	241	19.0	61	2,53	1
8	30/IV	44	10	430	180	900—3390	60	3,3	2
9	30/IV	44	10	420	—	2540	60	3,3	1
10	30/IV	44	—	430	—	1695—1751	60	3,3	2

Как видно из табл. 1, разрядники № 27<sup>a</sup> и 88 (строки 1, 2 и 3), открытые с обеих сторон, при расстоянии между электродами 700 mm и внутреннем диаметре 15—17 mm, не дают надежного гашения дуги при токе порядка 2500 A. Разрядник № 50<sup>b</sup> (4 и 5 строки) с электродом, ввинченным на резьбе (рис. 8) так, что между электродом и фиброй нет никакой щели, а следовательно, нет и резервуара, в той же схеме, при тех же

токах дуги не гасит. Разрядники № 23 и 28 (строки 6, 7) при расстоянии между электродами 240 mm и длине электрода, а следовательно, и резервуара вокруг электрода 350 mm (рис. 4) выключили те же токи в той же цепи по 15—16 раз по 1 полупериоду; при этом диаметр фибры в дугогасящей части постепенно увеличивается до 18—19 mm, после чего только разрядник начинал затягивать дугу. Разрядник № 44 (строки 8, 9, 10) выключал те же токи при длине электрода, а следовательно, и резервуара 430 mm. При этом из 3 раз 1 раз дуга погасла в 1 полупериоде и 2 раза в 2 полупериоде, повидимому, это расстояние уже предельное. Как видно из таблицы, наличие резервуара значительно повышает градиент гашения разрядника. Следует отметить, что для изготовления разрядников для защиты 110-kV сетей не могут быть применены столь маленькие промежутки. Напряжение в сети в приводимых испытаниях было порядка 110 kV (фазовое напряжение около 60 kV), в эксплоатации возможно повышение рабочего напряжения до 120 kV, скорость восстановления напряжения также может быть большей. Сравнение дугогасящих свойств конструкции, приведенных в табл. 1, производилось и в других схемах (другие токи, другие напряжения, разные скорости восстановления напряжений). Во всех случаях разрядник с резервуаром со стороны закрытого конца давал значительно большие градиенты гашения, чем другие типы.

В приводимых в табл. 1 опытах, резервуар был устроен внутри фибровой трубы вокруг электрода, входящего в трубку со стороны закрытого конца, путем соответствующего удлинения трубы. Устройством резервуара в наконечнике согласно рис. 5 можно достигнуть дальнейшего увеличения градиента гашения.

В табл. 2 приведены результаты испытания 110 kV разрядников на Зугрэс в январе 1936 года. Конструкция разрядников и их параметры приведены на рис. 9.

Как видно из таблицы, разрядник такой конструкции при длине искрового промежутка 300 mm и внутреннем диаметре фибры 16 mm выключал 5—6 раз ток 6000—9000 A и после этого еще гасил ток порядка 900—1000 A. В других опытах эти разрядники выключали и более 10 000 A. Разрядник с такими параметрами комиссией по разрядникам при Главэнерго и Главэнергопроме было признано целесообразным приме-

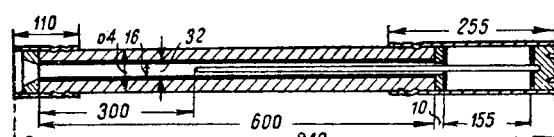


Рис. 9

Испытание 110 kV трубчатых разрядников на Зургес

Который раз испытывается разрядник	Обгорание электрода, мш	Время гашения дуги, полу-периоды	Выключенный ток $A_{eff}$	Объем резервуара, см <sup>3</sup>	Размеры кронного промежутка, мш
------------------------------------	-------------------------	----------------------------------	---------------------------	-----------------------------------	---------------------------------

Разрядник № 123

1	0	1	8100	440	—
2	10	1	3500	440	$L_0 = 300$
3	0	1	720	440	$L_1 = 350$
4	0	—	7000	440	$\emptyset_0 = 16$
5	30	2	5700	440	$\emptyset_1 = 21$
6	10	1	8250	440	—
7	0	1	5800	440	$L_0 = 300$
8	0	2	1120	440	$L_1 = 300$
9	0	1	520	440	$\emptyset_0 = 21$
10	0	2	1000	440	$\emptyset_1 = 21$

Разрядник № 104

6**	0	1	6000	440	$L_0 = 300$
7	0	2	8550	440	$L_1 = 32$
8	20	1	5250	440	$\emptyset_0 = 16$
9	0	1	8280	440	$\emptyset_1 = 22$
10	0	2	7050	440	—
11	—	1	8800	440	$L_0 = 320$
12	0	2	4250	440	—
13	0	1	9000	440	$L_1 = 320$
14	0	1	660	440	$\emptyset_0 = 22$
15	0	2	1000	440	$\emptyset_1 = 22$
16	0	1	1200	440	—
17	0	1	1120	440	$L_0 = 320$
			500—1100	440	$\emptyset_1 = 22$

\* При испытаниях на малые точки был установлен искровой промежуток, равный первоначальному (300 mm).

\*\* До этого опыта разрядник пять раз выключал в 1 полуperiод токи порядка 1000 A, при этом изменения внутреннего диаметра фибры и величины искрового промежутка не обнаружено.

Напряжение сети при испытаниях  $U_\phi = 60-62$  kV.

Примечание.  $L_0$  — Величина искрового промежутка до опыта.

$L_1$  — Величина искрового промежутка после опыта.

$\emptyset_0$  — Внутренний диаметр фибры до опыта.

$\emptyset_1$  — Внутренний диаметр фибры после опыта.

нять на токи от 1200 до 7000 A, считая по симметричному значению тока к. з., или до 10 000 A с учетом постоянной составляющей тока.

Хотя разрядник выключал симметричный ток в 850 A, однако один раз имел место несколько повторных зажиганий (столбец табл. 2, опыт 15). Поэтому нижним пределом установлен ток в 1200 A.

Необходимо отметить очень низкое качество фибры<sup>1</sup>, из которой были изготовлены разрядники. Улучшение качества фибры уменьшит ее обгорание, что увеличит кратность действия разрядников. Улучшение качества фибры повысит также механическую прочность разрядника, что позволит увеличить длину искрового промежутка.

<sup>1</sup> Фибра изготовлена Кинешемской фибровой фабрикой в начале 1935 г.

ка, оставляя неизменным верхний предел токов, тем самым увеличивая кратность разрядника. С точки зрения защитного действия в 110 kV разрядниках могут быть применены искровые промежутки больше 300 mm. В партии разрядников, изготовленных к грозовому сезону 1936 г. из лучшей фибры, искровой промежуток увеличен до 350 mm, при этом верхний предел выключаемых токов оставлен тем же, испытания показали, что он может быть даже повышен.

Таблица 3  
Сравнение дугогасящих свойств разрядников ТР-35 с фиброй производства фабрики «Кинешма» и фиброй американской. (Начальный диаметр фибры — 10 mm. Искровой промежуток — 150 mm).

Который раз испытывается разрядник	выключенный ток $A_{eff}$	Американская фибра				Кинешемская фибра			
		продолжительность дуги в полупериодах	который раз испытывается разрядник	выключенный ток $A_{eff}$	продолжительность дуги в полупериодах	который раз испытывается разрядник	выключенный ток $A_{eff}$	продолжительность дуги в полупериодах	
1	2800	1	8	1000	1	1	3500	1	
2	2450	1	9	960	1	2	3540	1	
3	3500	1	10	760	1	3	4200	1	
4	4550	1	11	1100	1	4	2280	1	
5	4900	1	12	1140	2	5	от 700 до 1200	7	
6	4370	1	13	940	1	6	530—1270	2	
7	4550	1	—	610	7	7	790—1180	2	
				940	8	8	650—1250	3	
				610	9	9	1050	2	
				940			570—1220		

\* Трубка не погасила короткое, отключил стреляющий предохранитель.

В табл. 3 дано сравнение многократности действия двух одинаковых 35-kV трубчатых разрядников нашей конструкции для сети с изолированной нейтралью, изготовленных из кинешемской фибры выпуска 1935 г. и из американской фибры. Как видно, кратность разрядника из американской фибры больше чем в 2 раза превосходит кратность разрядника из кинешемской фибры. Верхний предел выключаемых токов у него также в 2 раза выше. Освоение нашими заводами фибры, по качеству не уступающей американской, позволит значительно увеличить верхний предел и диапазон токов, надежно выключаемых разрядником, и увеличит его кратность действия.

Влияние резервуара на работу разрядников хорошо иллюстрируется следующим примером: в 1935 г. заводом «Электроаппарат» были выпущены 110-kV разрядники, состоящие из 2 разрядников, включенных последовательно (рис. 10). Общий искровой промежуток равнялся 700 mm ( $350 \times 2$ ) при внутреннем диаметре 16 mm. Распоряжением Главэнерго эти разрядники были возвращены энергообъединениям заводу, так как испытания показали, что они не обеспечивали гашения дуги.

Пристройка резервуара со стороны закрытого конца позволила из каждого 110-kV разрядника изготовить два на то же напряжение и обеспечить удовлетворительное гашение дуги даже при уменьшении искрового промежутка до 300 mm. Таким образом устройство резервуара позволило

повысить градиент гашения больше чем в 2,5 раза.

**Факторы, определяющие давление.** Давление в разряднике тем больше, чем интенсивнее газообразование и чем больше затруднен выход газов. Увеличение длины внешнего искрового промежутка в разряднике или уменьшение внутреннего его диаметра затрудняет выход газов, способствуя увеличению давления. Одновременно увеличивается сопротивление дуги, следовательно, возрастает выделяемая дугой энергия и газообразование в разряднике, еще больше увеличивая давление.

Устройство резервуара, увеличивая градиент гашения, позволяет уменьшить длину дугового промежутка в разряднике и увеличить его внутренний диаметр, что снижает давление в нем и позволяет значительно повысить верхнее значение величины токов, надежно выключаемых разрядником, при сохранении неизменным нижнего значения.

Опыт показывает, что для применяемой нами фибры производства Кинешемской фибровой фабрики выпуска 1934/35 г. главной причиной износа при больших токах является не испарение или сгорание внутренней поверхности под влиянием высокой температуры дуги, а механическая обдирка внутренней поверхности трубы раскаленными газами, выбрасываемыми наружу. Последнее подтверждается тем обстоятельством, что в разрядниках, закрытых с одной стороны, износ фибры тем больше, чем ближе к открытому концу. В разрядниках, открытых с обеих сторон, износ фибры увеличивается по направлению к концам трубы.

Характер износа хорошо подтверждается следующим опытом: в разрядник, открытый с обеих сторон (рис. 11), с внутренним диаметром фибры 16 мм с одной стороны (верхней) внутрь фибры был вставлен трубчатый электрод внутренним диаметром 10 мм, с другой стороны — трубчатый электрод с внутренним диаметром 16 мм. Таким образом, хотя выход газов происходил в обе стороны, главная масса газов выходила сквозь нижнее отверстие, так как выход газов через верхнее отверстие дросселировался электродом. При этом фибра выгорела конусом, расширяющимся по направлению к отверстию с более свободным выходом для газов. В верхней части износ незначителен, хотя в верхней части давление было заметно больше. Внутренняя поверхность фибры часто разлохмачивается, что значительно увеличивает ее износ, благодаря выбрасыванию хлопьев фибры во время работы. При испытаниях обычно наблюдается сноп искр, выбрасываемых из разрядников, представляющий собой раскаленные мелкие частицы фибры. При малых токах фибра выгорает более равномерно, это, повидимому, объясняется тем, что при этих токах обдирка фибры незначительна благодаря малому давлению в трубе.

Обдирание фибры значительно ухудшает условия работы разрядника. Мелкие частицы фибры, обдираемые проходящими газами и попадающие в дугу, где они со всех сторон окружены пламенем дуги, горят гораздо ин-

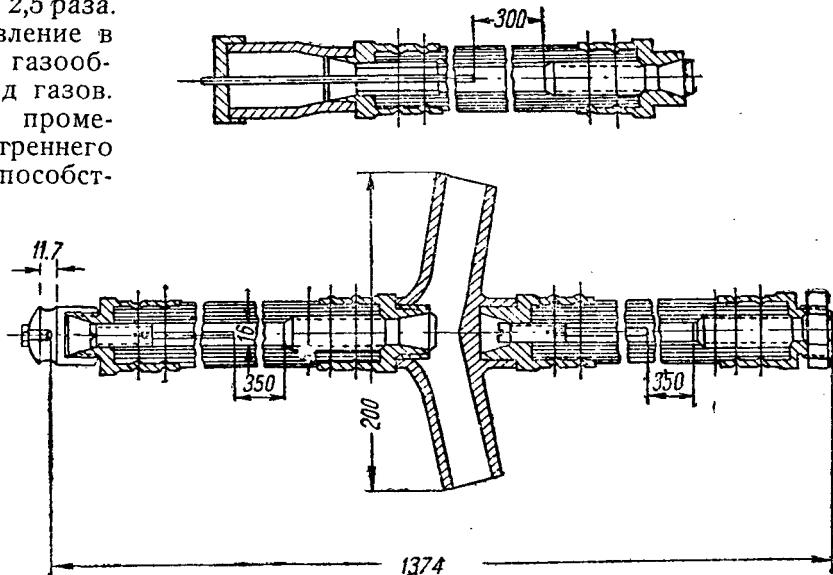


Рис. 10. Разрядник «Электроаппарат», снаженный резервуаром *a* и без него *b*

тенсивнее, чем поверхность трубы, соприкасающаяся с дугой. Мелкие частицы фибры затрудняют выход газов, что способствует очень интенсивному возрастанию давления в трубке с увеличением тока и, следовательно, снижает верхний предел выключаемых токов при неизменном нижнем пределе и приводит к быстрому износу разрядника.

При испытании разрядников, изготовленных из американской фибры, монолитной и более плотной, разлахмачивания фибры совершенно не наблюдается, наоборот, внутренняя поверхность фибровой трубы как бы полируется проходящими раскаленными газами. Искрения не наблюдается. Фибра при больших токах изнашивается равномерно по длине разрядника.

**Трубчатые разрядники для защиты подстанционной изоляции.** Значительное уменьшение искрового промежутка внутри разрядника, достижимое благодаря устройству резервуара, настолько сильно снижает разрядное напряжение разрядника, что позволяет применить его для защиты изоляции подстанций. Для напряжения в 110 кВ и выше, имеющих обычно глухо заземленную нейтраль, разрядник может дать удовлетворительную защиту изоляции существующих подстанций, без дальнейших приспособлений для снижения его защитного действия. Для наших 35-кВ подстанций, имеющих обычно изолированную нейтраль, защитное действие разрядника в таком виде еще недостаточно, так как длина искрового промежутка в разряднике должна выбираться из условий гашения дуги при линейном напряжении, а не при фазовом, как в системе с глухо заземленной нейтралью. Защита наших существующих 35-кВ подстанций усложняется из-

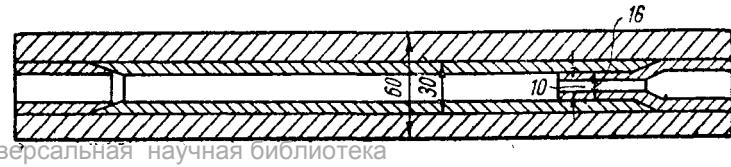


Рис. 11.

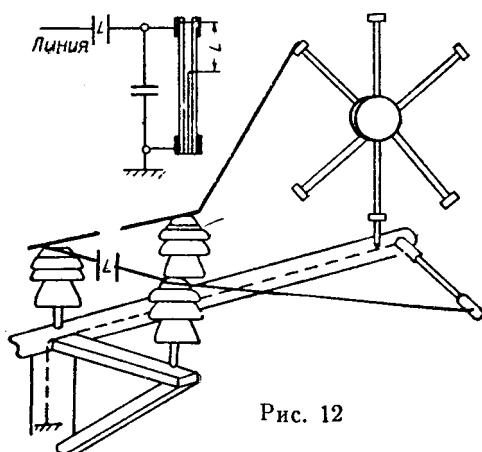


Рис. 12

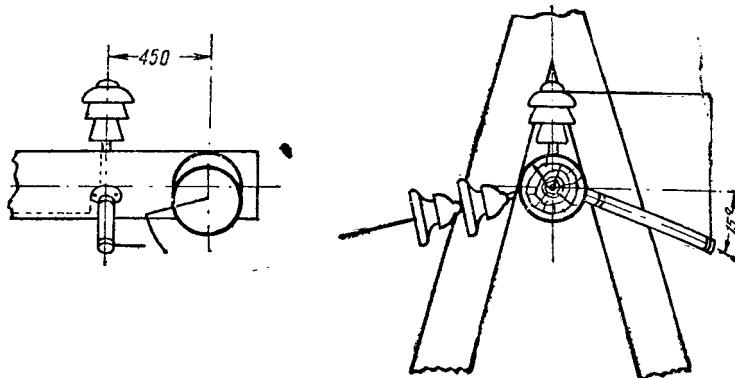


Рис. 14

за исключительно низкого качества их изоляции, которая не может быть надежно защищена никакими существующими разрядниками.

С целью понижения разрядного напряжения разрядника автором было предложено следующее устройство: параллельно трубке включается емкость, величина которой значительно превосходит емкость внешнего искрового промежутка. При отсутствии шунтирующей емкости напряжение распределяется между внешним и внутренним промежутком почти поровну и зависит от конструкции установки. При наличии ее напряжение почти целиком ложится на внешний промежуток, благодаря чему он пробивается при меньшей величине приложенного напряжения. После пробоя внешнего промежутка все напряжение целиком падает на внутренний, вызывая его пробой. Такое устройство значительно снижает разрядное напряжение разрядника. Снятые в ВЭИ вольтвременные характеристики<sup>2</sup> показали, что шунтирующая емкость снижает разрядное напряжение примерно на 25%. Эта емкость может быть выполнена в виде изолятора, на котором крепится искровой промежуток, и соединительного проводника длиной 1—2 м между трубкой и изолятором; установка его обычно не вызывает затруднений. На дугогасящих свойствах разрядника наличие шунтирующей емкости не оказывает

ся, так как внешний промежуток не играет заметной роли в гашении дуги; как уже указывалось, назначение внешнего искрового промежутка — предохранить фибрю от обугливания токами утечки. На рис. 12 показана установка 35-кВ трубчатого разрядника с внешней емкостью, со стреляющим предохранителем и с автоматической заменой, применяемая в Донэнерго; на рис. 13 дана установка одного трубчатого разрядника с внешней емкостью. Как видно, установка состоит из стандартного координирующего промежутка, в котором в разрез заземляющего провода вставлена трубка.

Пунктиром изображено крепление трубы со стороны выхода газов, жирными линиями — крепление с закрытого конца. На рис. 14 показана установка трубчатого разрядника с внешней емкостью на опорах линии передачи, применявшаяся в Донэнерго для монтажа на подходах к подстанции, в конце участка под тросом.

Как показали исследования, проведенные в ВЭИ, разрядники в подобной установке имеют настолько хорошее защитное действие, что защищают почти все типы 135-кВ изоляции, применяемые на наших подстанциях.

Все же наиболее слабые типы изоляции, имеющиеся на существующих 35-кВ подстанциях, не могут быть защищены этими разрядниками.

Дальнейшего снижения разрядного напряжения 35 и 110-кВ разрядников автору удалось достичь путем устройства приспособлений для каскадного (ступенчатого) разряда внутри разрядника. Как видно на рис. 5, в стенку разрядника со стороны выхода газов, между слоями бакелита вставлен дополнительный электрод (медная фольга 10-мм ширины), по длине равный 40—50% от длины искрового промежутка. При воздействии на разрядник волны перенапряжения почти все напряжение, приходящееся на трубку, ложится на промежуток внутри ее, между основным электродом и дополнительным, поэтому сначала пробивается часть искрового промежутка внутри трубы до того места, где кончается дополнительный электрод. После его пробоя все напряжение падает на оставшийся до конца трубы промежуток. Так как для перекрытия этого промежутка требуется меньшее напряжение, чем для пробоя стенки трубы до дополнительного электрода, разряд заканчивается на внутренней поверхности трубы.

<sup>2</sup> Вольтвременные характеристики этих разрядников опубликованы в статье инж. Л. И. Иванова и инж. В. К. Кожухова. «Электрические станции», № 7, 1936 г.

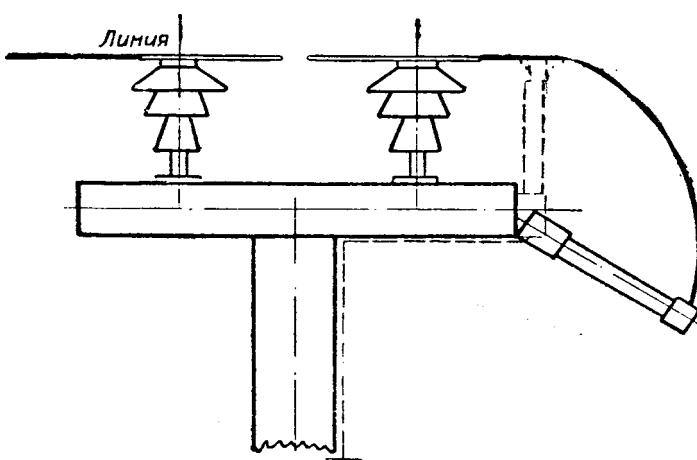


Рис. 13

на разряднике вслед за пробоем его искрового промежутка, наличие дополнительного электрода не сказывается, если он не перекрывает больше чем 40—50% длины искрового промежутка в разряднике. Объясняется это тем, что при гашении дуги после прохождения тока через нулевое значение искровой промежуток сохраняет некоторую проводимость, лишь постепенно исчезающую, по мере десионизации заполняющих его газов. Вызванный этим ток утечки способствует выравниванию поля внутри разрядника и более равномерному распределению восстановливающегося на дуге напряжения. Испытания такой конструкции показали ее удовлетворительную работу.

Наличие дополнительного электрода, проложенного внутри стенки разрядника, увеличивает отношение разрядного напряжения по внешней поверхности трубы к разрядному напряжению внутри, что облегчает задачу предохранения разрядника от перекрытий по внешней поверхности. Без дополнительного электрода трудно обезопасить трубку от перекрытий по внешней поверхности при данной конструкции разрядников, особенно при порче лаковой поверхности.

Устройство внутри разрядника со стороны выхода газов трубчатого электрода, подобно тому как это делает фирма «Вестингауз» (рис. 1), дало бы возможность улучшить соотношение, однако плохая разлохмачивающаяся во время работы фибра, производимая Главбумпромом, не позволяет устраивать трубчатый электрод, так как это приводит к значительному снижению верхнего предела токов, выключаемых разрядником.

Гарантировать всегда разряд внутри при воздействии на разрядник импульсов достаточной для разряда величины в разряднике данной конструкции без дополнительного электрода при удовлетворительном лаковом покрове можно лишь при расстоянии между электродами не больше чем 60—65% от расстояния между наконечниками снаружи. При наличии дополнительного электрода разряд происходит всегда внутри, даже при расстоянии между электродами внутри трубы, превышающем расстояние между наконечниками снаружи (100—110%). По данным Торока, чтобы предохранить разрядник с трубчатыми электродами от перекрытий по внешней поверхности (импульсным напряжением), необходимо, чтобы расстояние внутри трубы не превышало 80—85% от расстояния между наконечниками снаружи. Необходимо отметить, что американские лаки, покрывающие разрядник, лучше наших, а вероятность перекрытия по внешней поверхности заметно увеличивается при ухудшении лакового покрова.

На рис. 15 приведены характеристики защитного действия 35-kV разрядников с дополнительным электродом, выраженные в долях искрового промежутка. По оси абсцисс отложено напряжение генератора, а на оси ординат дано расстояние между стержнями включенного параллельно разряднику искрового промежутка стандартной формы (стержни 16 × 16), при котором 50% разрядов происходит в разряднике, а 50% между стержнями. Все испытания производились на волне 1,5/40  $\mu$ S. Кривые 1 рис. 15 получены для разрядника с дополнительным электродом, уста-

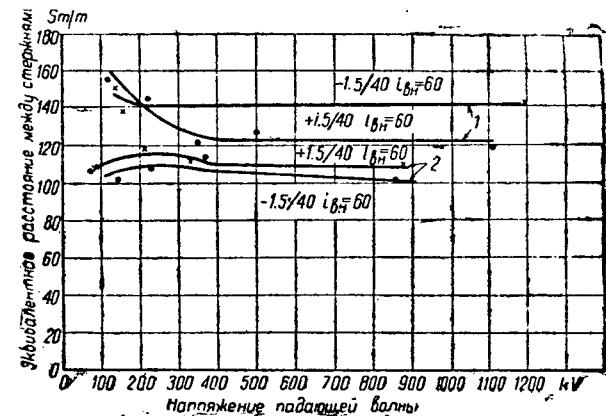


Рис. 15. Импульсные характеристики в долях искрового промежутка (американский стандартный стержень 16 × 16 mm), разрядник типа РТС-35  $I_{\text{час}} = 175$ ;  $I_{\text{макс}} = 410$  mm; дополнительный электрод  $100 \times 10$

1 — разрядники без шунтирующей емкости, 2 — при наличии ее

новленного без внешней емкости, кривые 2 — для установки с внешней емкостью<sup>3</sup>.

Низкое разрядное напряжение при импульсах дает возможность защищать этим разрядником в установке с внешней емкостью почти все типы изоляции, встречающиеся на наших 35-kV подстанциях<sup>4</sup>.

К сожалению, вся партия разрядников, выпущенных к грозовому сезону 1936 г., оказалась не годной к установке ввиду того, что завод «Изолит» при изготовлении фибробакелитовых трубок не выдержал длины дополнительного электрода, которая колебалась от 30 до 150 mm вместо заданных 80 mm, к тому же пережег фибр. Лишь в конце июня была получена от завода «Изолит» первая партия более удовлетворительно изготовленных трубок; изготовленные из нее разрядники были установлены в конце июня, когда интенсивность грозы уже значительно снизилась. Благодаря этому в период более интенсивной грозовой деятельности защита 38-kV подстанций была неудовлетворительна из-за отсутствия доброкачественных разрядников, что вызвало значительную аварийность на этих подстанциях.

Для 110-kV подстанций можно получить вполне удовлетворительную защиту разрядниками данной конструкции, без применения внешней емкости.

В 1935 и 1936 гг. все 110-kV подстанций системы Донэнерго защищались подобными трубчатыми разрядниками, при этом в 1935 г. не было ни одной аварии с изоляцией подстанций, в 1936 г. имела место одна авария с проходным бакелитовым изолятором, который дважды перекрывался в предыдущие годы и после очистки обожженного слоя вновь устанавливается ввиду отсутствия резерва. До установки трубчатых разрядников число грозовых аварий с оборудованием на 110-kV подстанциях было ежегодно 10—15 даже при защите их координирующими промежутками 400—500 mm.

Защита подстанций напряжением выше 110 kV

<sup>3</sup> Снятие высоковольтных характеристик этих разрядников производится в лаборатории им. проф. Смурова.

<sup>4</sup> См. таблицу разрядных напряжений изоляций. «Электрические станции», № 7, 1936 г. статья Л. И. Иванова и В. К. Кожухова стр. 5, табл. 1.

затруднений не вызывает, так как выше рабочее напряжение, тем лучшая характеристика защитного действия разрядника может быть получена.

С увеличением рабочего напряжения увеличивается индуктивность трансформаторов и минимальная длина линий. Для 220 кВ, например, длина линии меньше 50—60 км мало вероятна, а в СССР линии, находящиеся в эксплуатации или входящие в строй в ближайшие годы, имеют длину, превышающую 100 км. В таких условиях относительная скорость восстановления напряжения (скорость восстановления напряжения на сантиметр длины дуги в разряднике) очень мала, следовательно, условия гашения дуги очень легкие, что значительно облегчает изготовление трубчатого разрядника, обладающего хорошей защитной характеристикой. Для защиты 220-кВ подстанций могут быть установлены два 110-кВ разрядника, включенных последовательно.

В заключение необходимо отметить, что для защиты существующих подстанций, имеющих очень слабую изоляцию, недостаточно установки одного комплекта разрядников на подстанции. Необходимо установить дополнительно два-три комплекта разрядников на участке линии 1,5—2 км, непосредственно примыкающем к подстанции, защищенному тросом. В этом случае основ-

ная линия защиты подстанции выносится далеко вперед, разрядник на подстанции является резервом, который на нетупиковых подстанциях почти не будет работать. Установка нескольких комплектов разрядников на подходе к подстанции уменьшит износ фибры в разрядниках, так как при набегании волн одновременно будут работать 2—3 разрядника (что подтверждается эксплуатацией), это уменьшит в 2—3 раза ток в каждом из них, чем в несколько раз увеличит кратность действия разрядников.

## ЛИТЕРАТУРА

1. J. J. Togok and A. M. Opsahl, The Deion Flaschover Protector. Electrical Journal, March 1932.
2. J. J. Togok and A. M. Opsahl, The Deion Flaschover Protector. Transactions of AIEE, 1933, p. 895.
3. Westinghouse surge Protection, April 1935, фирменная брошюра.
4. K. B. McEachron, L. W. Gross and H. L. Melvin, The Expulsion Protective Gap. Transactions of AJEE, 1933, p. 884.
5. J. Slepian and C. L. Denault, The Expulsion Fuse. AIEE Transactions, 1932, p. 157.
6. Л. Е. Машкильсон, Определение скорости восстановления напряжения на контактах выключателя при гашении дуги. Высоковольтное аппаратостроение. ОНТИ Сборник статей, 1935.
7. Г. Т. Третьяк, Восстановление напряжения на дуге и элементарные методы его подсчета, «Вестник электропромышленности», № 4, 1933.

# Конденсаторные электродвигатели

CAPACITOR MOTORS

Г. Б. Меркин

Ленинградский индустриальный институт

В ПОСЛЕДНЕЕ время электрические двигатели однофазного тока начинают находить себе достаточно широкое применение (электрическая тяга, сельское хозяйство, бытовые установки, телемеханика и т. д.). В большинстве случаев используются однофазные коллекторные двигатели, обладающие хорошими пусковыми свойствами; однако их крупнейшими недостатками являются тяжелые условия коммутации и низкий  $\cos\varphi$ . Нормальный однофазный асинхронный двигатель, требующий специальных устройств для пуска, мало применяется; при нормальной работе он имеет низкий  $\cos\varphi$  и для него характерно плохое использование. Поэтому в последнее время возник вопрос о применении конденсаторных двигателей, питаемых от однофазной сети. Эти двигатели по своему принципу работы являются в большинстве случаев асинхронными и лишь в некоторых случаях применяют конденсаторные реактивные двигатели [1]. Обмотка статора может быть или аналогична обмотке трехфазного двигателя или же двухфазной.

К числу наиболее рациональных могут быть отнесены пять схем (рис. 1). Схемы 1—4 имеют на статоре обмотки, аналогичные обмотке трехфазного двигателя, в схеме 5 применены 2 обмотки, соединенные между собой в пространстве на 90°.

электрических градусов, причем соотношение числа витков в них может быть выбрано наивыгоднейшим. Произведем краткий анализ этих схем, используя при этом метод симметричных составляющих. Уравнения для фазовых токов и напряжений схемы 1 имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} I_A &= I_a + I_i; \\ I_B &= I_a a^2 + I_i a; \\ I_C &= I_a a + I_i a^2. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A &= I_a Z_a + I_i Z_i; \\ \dot{U}_B &= I_a Z_a a^2 + I_i Z_i a; \\ \dot{U}_C &= I_a Z_a a + I_i Z_i a^2. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Здесь:  $I_a$  и  $I_i$  — токи прямой и обратной последовательностей фаз;  $Z_a$  и  $Z_i$  — комплексы полных сопротивлений обеих последовательностей;

$$a = -0,5 + 0,5\sqrt{3}j; \quad a^2 = -0,5 - 0,5\sqrt{3}j.$$

Недостающие для определенности два уравнения получаются при помощи закона Кирхгофа:

$$U - \dot{U}_A + \dot{U}_C = 0 \quad (3)$$

$$U - \dot{U}_A + \dot{U}_B + I_B Z_k = 0, \quad (4)$$

где  $U$  — напряжение сети, а  $Z_k \approx jx_k$  — сопротивление конденсатора.

Решая совместно уравнения (1), (2), (3) и (4), получим:

$$\left. \begin{aligned} i_a &= \dot{A} \frac{(a - a^2) Z_i + a Z_k}{a - a^2}; \\ i_i &= \dot{A} \frac{(a - a^2) Z_a - a^2 Z_k}{a - a^2}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} i_A &= \dot{A} (Z_a + Z_i + Z_k); \\ i_B &= \dot{A} (a^2 Z_i + a Z_a); \\ i_C &= \dot{A} (a Z_i + a^2 Z_a - Z_k), \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где

$$\dot{A} = \frac{U}{3Z_a Z_i + Z_k (Z_a + Z_i)}.$$

Зная токи, можно получить соответствующие напряжения.

Параметры  $Z_a$  и  $Z_i$  лучше всего определить из точной эквивалентной схемы асинхронного двигателя (рис. 2).

На этой схеме:

$r_1$  и  $x_1$  — активное и индуктивное сопротивления одной фазы статора;

$r_2'$  и  $x_2'$  — приведенные значения сопротивления ротора при определении  $Z_a$ ;

$\frac{r_2'}{2-s}$  и  $x_2'$  — приведенные значения сопротивлений ротора при определении  $Z_i$ .

С достаточной степенью точности можно принять  $Z_i = (r_1 + \frac{r_2'}{2-s}) + jx$ , где  $x = x_1 + x_2'$ . Вращающий момент конденсаторного двигателя определяется, как арифметическая разность моментов для прямой и обратной последовательностей:

$$\left. \begin{aligned} M_a &= 0,0162 \frac{mp}{f} \cdot \frac{E_a^2 \frac{r_2'}{s}}{\left(\frac{r_2'}{s}\right)^2 + x_2'^2}; \\ M_i &= 0,0162 \frac{mp}{f} \cdot \frac{E_i^2 \frac{r_2'}{2-s}}{\left(\frac{r_2'}{2-s}\right)^2 + x_2'^2}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Здесь:  $m$  — число фаз;  $p$  — число пар полюсов;

$f$  — частота тока в Hz;

$E_a = I_a (Z_a - Z_1)$  — э. д. с. прямой последовательности фаз;

$E_i = I_i (Z_i - Z_1)$  — э. д. с. обратной последовательности фаз;

$s$  — скольжение двигателя и  $Z_1 =$

$$= r_1 + jx_1.$$

Зная значения токов и напряжений в комплексном виде, можно определить соответствующие коэффициенты мощности для каждой из фаз в отдельности. Коэффициент мощности линии  $\cos \varphi$  определяется лишь комплексом тока  $I_a$ , так как напряжение сети нами принято направленным по

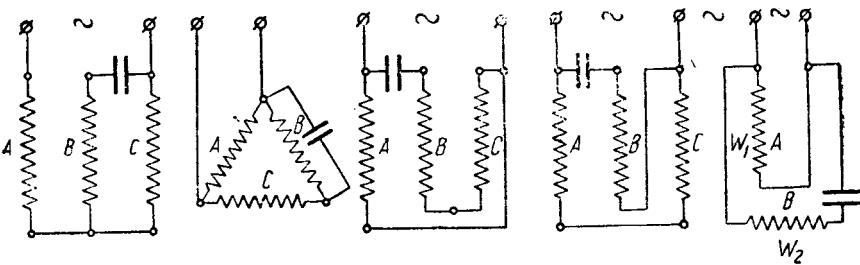


Рис. 1

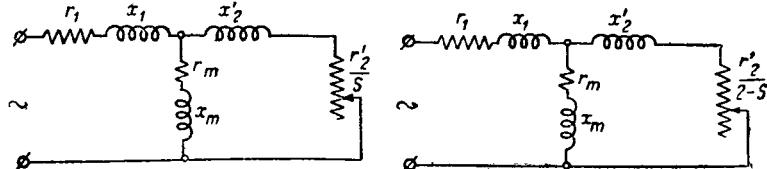


Рис. 2

вещественной оси. Подведенная к двигателю мощность  $P_1 = UI_A \cos \varphi_b$ , а полезная мощность:  $P_2 = 1,028 M_b n$ , где  $M_b = M - M_0$ , а  $n = n_1 (1 - s)$ .

$M_0$  обозначает момент холостого хода, определяемый механическими потерями, а  $n_1 = \frac{10 \cdot f}{p}$  — синхронная скорость двигателя.

Отсюда, как обычно, к. п. д. двигателя  $\eta \% = \frac{P_2}{P_1} 100\%$ .

Как указывалось в моей предыдущей работе [2], равномерная нагрузка фаз у двигателя получается при  $\cos \varphi = 0,5$  для каждой из фаз. При этом напряжение на зажимах конденсаторов равно напряжению сети, т. е.  $U_k = U$ . Если при расчете двигателя исходить из равномерной нагрузки фаз, то необходимая при этом мощность батареи конденсаторов

$$P_k = U_k I_B \approx UI_B,$$

а рабочая емкость конденсаторов:

$$C \approx \frac{P_k}{U^2 2\pi f}.$$

При номинальной нагрузке подводимая мощность

$$P_1 = UI_B \cos \varphi_l \approx (0,9 \div 1,0) UI_B$$

и мощность батареи

$$P_k = (1,0 \div 1,1) P_1.$$

Так как в двигателях мощности от 0,1 kW и выше при номинальной нагрузке  $\cos \varphi > 0,5$ , то при этом напряжение на зажимах конденсаторов становится меньше напряжения сети, и тогда  $P_k = (0,9 \div 1,0)$  от  $P_1$ . Поэтому в большинстве случаев рабочая емкость

$$C = \frac{(0,9 \div 1,1) P_1}{U^2 2\pi f}. \quad (8)$$

Основным недостатком конденсаторных двигателей при схеме 1 является плохой пусковой момент при короткозамкнутом роторе, у которых он составляет не выше (15—20)% номинального. Поэтому схема не может быть применена для короткозамкнутых двигателей, пускаемых под нагрузкой. При введении сопротивлений в ротор пусковые моменты резко увеличиваются и доходят до (65—85)% номинального, что де-

ляет возможным применение этой схемы для целей сельского хозяйства (электромолотьба и т. п.). Однако попытки применения в сельском хозяйстве короткозамкнутых конденсаторных двигателей при данной схеме, как и следовало ожидать, не увенчались успехом. Произведенный подсчет [2] для двигателя Бушеро на 3 kW дал значение пускового момента, равное всего 10% номинального. Такая схема неприемлема для целей электрической тяги, так как там требуется пусковой момент, равный примерно номинальному, что невозможно получить при схеме 1, даже при пусковых емкостях выше рабочих.

Принципиально схема 2 аналогична первой, так как соединение треугольником можно всегда привести к эквивалентной звезде. Пусковой момент получается на 5–10% выше благодаря меньшей асимметрии; однако при рабочем режиме машины требуется весьма точный подбор рабочей емкости во избежание резкого перераспределения нагрузки по фазам, что в гораздо меньшей мере оказывается при схеме 1. Поэтому целесообразнее работать при схеме 1.

В схеме 3, в отличие от схемы 1, появляется также и нулевая составляющая тока. Уравнения для фазовых токов и напряжений примут следующий вид:

$$\left. \begin{array}{l} \dot{I}_A = \dot{I}_0 + \dot{I}_a + \dot{I}_i; \\ \dot{I}_B = \dot{I}_0 + \dot{I}_a a^2 + \dot{I}_i a; \\ \dot{I}_C = \dot{I}_0 + \dot{I}_a a + \dot{I}_i a^2; \end{array} \right\} \quad (9)$$

$$\left. \begin{array}{l} \dot{U}_A = \dot{I}_0 Z_0 + \dot{I}_a Z_a + \dot{I}_i Z_i; \\ \dot{U}_B = \dot{I}_0 Z_0 + \dot{I}_a Z_a a^2 + \dot{I}_i Z_i a; \\ \dot{U}_C = \dot{I}_0 Z_0 + \dot{I}_a Z_a a + \dot{I}_i Z_i a^2. \end{array} \right\} \quad (10)$$

Здесь  $\dot{I}_0$  и  $Z_0$  — ток и сопротивление нулевой составляющей.

Еще три уравнения составляем на основании законов Кирхгофа:

$$U - \dot{U}_A = 0; \quad (11)$$

$$\dot{I}_B + \dot{I}_C = 0; \quad (12)$$

$$U - \dot{U}_C + \dot{U}_B + \dot{I}_B Z_k = 0. \quad (13)$$

Решая совместно уравнения (9)–(13), получим следующие значения токов:

$$\left. \begin{array}{l} \dot{I}_0 = [(a^2 - a) Z_k - 2a Z_a + 2a^2 Z_i] \dot{B}; \\ \dot{I}_a = [(a^2 - a) Z_k + 4a^2 Z_i - Z_0] \dot{B}; \\ \dot{I}_i = [(a^2 - a) Z_k - 4a Z_a + Z_0] \dot{B}; \end{array} \right\} \quad (14)$$

$$\left. \begin{array}{l} \dot{I}_A = 3\dot{I}_0 = [3(a^2 - a) Z_k - 6a Z_a + 6a^2 Z_i] \dot{B}; \\ \dot{I}_B = -\dot{I}_C = [(a - a^2) Z_0 - (2a + 4a^2) Z_a + (2a^2 + 4a) Z_i] \dot{B}, \end{array} \right\} \quad (15)$$

где

$$\dot{B} = \frac{U}{(a^2 - a) \{4Z_a Z_i + Z_0 (Z_a + Z_i) + Z_k (Z_0 + Z_a + Z_i)\}}.$$

Зная токи, можно получить соответствующие напряжения.

Параметры  $Z_a$  и  $Z_i$  попрежнему находятся из эквивалентных схем для прямой и обратной составляющих (рис. 2); гораздо сложнее обстоит дело с определением  $Z_0 = r_0 + jx_0$ . Если опытное определение этой величины достаточно просто (например способом Моргана), то рассчитать  $Z_0$  чрезвычайно затруднительно. В отличие от син-

хронных машин, где  $r_0 \approx r_1$ , а  $x_0$  определяется, главным образом, геометрическим расположением обмотки статора, в асинхронных машинах благодаря малому воздушному зазору сильно скажется влияние железа ротора и  $x_0$  резко возрастает. В результате, в асинхронных машинах малой мощности (до 5 kW)  $x_0 \approx 3x_1$  при диаметральном шаге обмотки статора, в машинах средней и крупной мощностей при том же шаге можно принять  $x_0 \approx x$ . Что касается  $r_0$ , то в машинах малой мощности оно также больше  $r_1$  ( $r_0 = 1,3 \div 1,5 r_1$ ); в машинах средней и крупной мощностей при расчетах с достаточной степенью точности можно принять  $r_0 \approx r_1$ , тем более, что в этих машинах сама величина  $r_0$  становится относительно малой. Вообще, весь вопрос об определении параметра  $Z_0$  для асинхронных машин представляет большой теоретический и практический интерес и требует специального подробного исследования.

Вращающий момент,  $\cos \varphi$ , мощность двигателя и к. п. д. определяются так же, как было указано выше при анализе схемы 1.

Напряжение на зажимах конденсаторов, при условии симметрии напряжений по фазам [2], равно двойному напряжению сети, т. е.  $U_k = 2U$ . Практически, при номинальной нагрузке, даже при равенстве фазовых токов по величине, мы не имеем симметрии напряжений, так как токи, будучи равны по величине, — несимметричны. Поэтому, большей частью  $U_k = (2,0 \div 2,2) U$ . Потребная мощность конденсаторной батареи  $P_k = U_k I_B = (2,0 \div 2,2) U I_B$ .

Подводимая к двигателю кажущаяся мощность  $P_{1N} (\text{kVA}) \approx 3U I_B$ .

Следовательно, необходимая рабочая емкость конденсаторов

$$C = \frac{P_k}{U_k^2 2\pi f} = \frac{(0,67 \div 0,73) P_{1N} (\text{kVA})}{[(2,0 \div 2,2) U]^2 2\pi f}. \quad (16)$$

Так как  $P_{1N} (\text{kVA}) = \frac{P_{2N}}{\eta_N \cos \varphi_N}$ , где  $\cos \varphi_N$  — номинальный коэффициент мощности при питании двигателя трехфазным током, то  $P_k = \frac{(0,67 \div 0,73) P_{1N}}{\eta_N \cos \varphi_N}$ . Очевидно, для заданной полезной мощности двигателя потребная мощность конденсаторной батареи будет тем меньше, чем выше к. п. д. и коэффициент мощности в нормальном трехфазном режиме.

Значительные преимущества получаются по сравнению со схемой 1 с точки зрения пусковых моментов. Уже при рабочих емкостях пусковые моменты при схеме 3 составляют (80–90)% номинального вместо (65–85)% при схемах 1 и 2 (большие значения относятся к машинам крупной мощности). Еще большая разница получается при увеличении пусковых емкостей. В то время как максимальный пусковой момент (для любой емкости) при схемах 1 и 2 равен  $(0,8 \div 0,95) M_N$ , т. е. всегда ниже номинального, при схеме 3 этот момент резко возрастает с увеличением емкости и может быть доведен до (200–250)% номинального. Последний фактор дает возможность применить короткозамкнутые двигатели в ряде отраслей хозяйства. Например, подсчет, произведенный для того же двигателя Бушеро на 3 kW, дал при увеличении емкости в 2 раза по срав-

нению с рабочей пусковой момент, равный 60% номинального, вместо 12–15% при схемах 1 и 2. В связи с этим большой интерес представляют электролитические конденсаторы [7], которые, давая громадную экономию в весе и объеме, могут быть использованы в качестве пусковой емкости.

Необходимо, однако, отметить, что в сельском хозяйстве, где конденсаторные двигатели приключаются через трансформатор, схема 1 конкурентоспособна со схемой 3 из-за большой экономии в необходимой мощности трансформатора. Однако для целей электрической тяги, схемы 1 и 2 не пригодны из-за малых пусковых моментов, в то время как при схемах 3, 4 и 5 конденсаторные двигатели для электровозов вполне применимы.

Составив для схемы 4, аналогично как и для схемы 3, девять уравнений, получим следующие значения токов:

$$\left. \begin{array}{l} i_0 = (2a^2 Z_a - 2a Z_i) \dot{C}; \\ i_a = (-4a Z_i + Z_0 + 3Z_k) \dot{C}; \\ i_i = (4a^2 Z_a - Z_0 - 3Z_k) \dot{C}; \end{array} \right\} \quad (17)$$

$$\left. \begin{array}{l} i_A = 3i_0 = (6a^2 Z_a - 6a Z_i) \dot{C}; \\ i_B = -i_C = [(a^2 - a)(Z_0 + 3Z_k) + \\ + 4(Z_a - Z_i) + 2a^2 Z_a - 2a Z_i] \dot{C}. \end{array} \right\} \quad (18)$$

Здесь:

$$\dot{C} = \frac{U}{(a^2 - a)[4Z_a Z_i + (3Z_k + Z_0)(Z_a + Z_i)]}.$$

Эти уравнения, в несколько другом виде, впервые получены инж. Н. М. Булаевым [3]; однако при определении параметров  $Z_a$  и  $Z_i$  он пользуется упрощенными круговыми диаграммами, что вносит большие погрешности.

Зная токи, можно получить соответствующие напряжения.

Параметры, моменты, мощности,  $\cos \varphi$  и к. п. д. определяются аналогично схеме 3. Напряжение на зажимах конденсаторов при номинальной нагрузке при условии симметрии напряжений фаз [2] равно двойному фазовому, т. е.

$$U_k = 2U_p = 1,155U.$$

Практически  $U_k = (1,12 \div 1,18)U$ .

Рабочая мощность конденсаторной батареи  $P_k = U_k I_B = (1,12 \div 1,18)U I_B$ .

Так как  $P_{1N}(\text{kVA}) = 3U_p I_B$ , то рабочая емкость:

$$C = \frac{P_k}{U_k 2\pi f} = \frac{(0,65 \div 0,68) P_{1N}(\text{kVA})}{[(1,12 \div 1,18)U]^3 2\pi f}. \quad (19)$$

По сравнению со схемой 3 имеется некоторая экономия в мощности за счет большей симметрии напряжений по фазам. Однако при специальном расчете конденсаторных двигателей разница получается весьма незначительной. Как и при схеме 3, существенно экономится мощность батареи по сравнению со схемами 1 и 2.

Пусковые моменты при данной схеме могут быть определены, пользуясь или уравнениями (17) или выведенными мною ранее в другой статье [2]. Пусковые моменты примерно равны таковым схемы 3, и, следовательно, также и эта схема может найти себе самое широкое применение в ряде отраслей народного хозяйства. Для двигателей малой мощности до  $1 \div 2 \text{ kW}$  конденсаторные двигатели при схеме 4 дают несколько худшие по

казатели по сравнению со схемой 3; при мощностях от 2 до  $20 \text{ kW}$  обе схемы примерно равнозначны; для конденсаторных двигателей крупной мощности (например для электровозов) схема 4 дает лучшее использование двигателя и при этом почти исключается опасность резонанса напряжений и токов.

М. Крондль [4] дает следующие уравнения для токов прямой и обратной составляющих схемы 5:

$$\left. \begin{array}{l} i_a = U \frac{Z'_k + Z'_i(1 - kj)}{2Z'_a Z'_i + Z_k(Z'_a + Z'_i)}; \\ i_i = U \frac{Z'_k + Z'_a(1 + kj)}{2Z'_a Z'_i + Z_k(Z'_a + Z'_i)}. \end{array} \right\} \quad (20)$$

Здесь:  $k$  – коэффициент трансформации между двумя обмотками:

$$\left. \begin{array}{l} k = \frac{w_1}{w_2}; \\ i_A = i_a + i_i; \\ i_B = kj(i_a - i_i). \end{array} \right\} \quad (21)$$

Эти формулы, получаемые из основных соотношений для токов, приводимых Рихтером в курсе синхронных машин [5], а также Вагнером и Эвансоном [6], будут справедливы лишь в том случае, если  $k = 1$ .

При разном же числе витков по фазам уравнения Крондля верны лишь в том случае, если пренебречь изменениями обмоточных коэффициентов. Однако на практике такое пренебрежение может привести к весьма большим погрешностям, доходящим до  $20 \div 30\%$ . Это наглядно иллюстрируется сравнением схем 3 и 5. Пусть у нас в схемах 3 и 5 оборваны фазы, в которые включены емкости, т. е. примем  $Z_k = \infty$ . Тогда, согласно уравнению (15),

$$i_A = \frac{3U}{Z_0 + Z_a + Z_i},$$

а для схемы 5, согласно уравнению (21),

$$i_A = \frac{2U}{Z'_a + Z'_i},$$

т. е. уравнения Крондля для данного частного случая не учитывают влияния нулевой составляющей.

Для всех двигателей с  $\cos \varphi = 0,8 \div 0,9$  целесообразней пользоваться схемой 4. При  $\cos \varphi = 0,5$  наиболее рациональной является схема 3. Схема 5 будет наиболее рациональной при  $\cos \varphi = 0,65 \div 0,8$ . Необходимо отметить, что при  $\cos \varphi = 0,5$ , во всех тех случаях, где не требуется больших пусковых моментов, весьма рациональны схемы 1 и 2. Более точный выбор наиболее экономичной схемы может быть произведен на основании расчета при помощи приведенных уравнений.

**Примерный расчет.** Для иллюстрации практического применения полученных уравнений произведем примерный расчет конденсаторного двигателя для пассажирского электровоза, соединенного с колесами зубчатой передачей и работающего при синхронных скоростях  $n_1 = 250, 375, 500$  и  $750$  об/мин. Электровоз снабжен 2 двигателями, причем первые 2 ступени скорости получаются каскадным включением двигателей; две последние – переключением числа пар полюсов. При

$n_1 = 750$  об/мин конденсаторный двигатель, рассчитанный на 3000 В, имеет следующие параметры:

$$\begin{aligned} r_1 &= 0,12 \Omega; & r'_1 &= 0,13 \Omega; \\ x_1 &= 1,06 \Omega; & x'_1 &= 0,78 \Omega; \\ r_0 &= r_1 = 0,12 \Omega; & x_0 &\approx 1,2 \Omega; \\ Z_m &= 2,2 + 30,8j; \end{aligned}$$

Произведем, например, расчет для схемы 4. Согласно рис. 2:

$$Z_a = Z_1 + \frac{Z_m \left( \frac{r'_1}{s} + jx'_1 \right)}{Z_m + \left( \frac{r'_1}{s} + jx'_1 \right)}.$$

При  $s = 0,018$

$$\begin{aligned} Z_a &= 6,56 + 3,28j; \\ Z_i &= 0,18 + 1,84j. \end{aligned}$$

Тогда уравнение (17)

$$\begin{aligned} I_a &= 201,5 - 99,4j; \\ I_i &= -54 + 30,6j. \end{aligned}$$

Согласно уравнению (18):

$$\begin{aligned} I_A &= I_B = I_C = 250 \text{ A}; \\ E_a &= I_a (z_a - z_i) = 1560 \text{ V}; \\ E_i &= I_i (z_i - z_0) = 50 \text{ V}. \end{aligned}$$

По уравнению (7),  $M_a = 1292 \text{ kg m}$ ;  $M_i = 2$ ;  $M = M_a - M_i = 1290 \text{ kg m}$ .

Так как момент холостого хода согласно расчету равен 30 kg m, то полезный момент двигателя  $M_b = M - M_0 = 1260 \text{ kg m}$  и полезная мощность

$$P_2 = 1,028 M_b n_1 (1 - s) = 950 \text{ kW}.$$

Необходимое сопротивление конденсаторной батареи определено из уравнения:

$$z_k = \frac{(1,12 \div 1,18) U}{I_N} = (13,4 \div 14,1) \Omega.$$

Нами взято при расчете  $z_k = 13,4 \Omega$ . Следовательно, потребная рабочая мощность конденсаторной батареи

$$P_k = 1,12 U I_N = 840 \text{ kVA}.$$

т. е.  $\sim 89\%$  от полезной мощности двигателя.

Определим теперь пусковой момент.

Введем, например, в ротор такое сопротивление, чтобы  $r'_2 + r_x = 7,23 \Omega$ . Тогда

$$z_a = z_i = 6,56 + 3,28j.$$

Уравнения (17) дают:  $I_a = 208 \text{ A}$ ;  $I_i = 34 \text{ A}$ ;  $M_n = 1045 \text{ kg m}$ .

Как видим, пусковой момент при рабочей емкости равен 81% от номинального. При более точном подборе сопротивлений в роторе пусковой момент составит примерно 83% от номинального.

Хотя в электрической тяге желателен пусковой момент, равный номинальному, дополнительной емкости для пуска устанавливать на электровозе не требуется, так как его пуск начинается с каскадных включений, при которых вся емкость конденсаторов второго двигателя является свободной, что дает возможность не только получить нужные пусковые моменты, но и улучшать  $\cos \varphi$  сети. Этим свойством конденсаторные двигатели резко отличаются от нормальных трехфазных асинхронных двигателей, при каскаде которых резко ухудшается  $\cos \varphi$ .

К числу основных недостатков конденсаторных двигателей необходимо отнести следующие:

1. Необходимость мощной батареи конденсаторов, составляющей 75÷100% подводимой к двигателю мощности.

2. Неполное использование двигателей. При схемах 3 и 4 использование мощности двигателя, по сравнению с нормальным трехфазным режимом, составляет 70—90%, последняя цифра для двигателей большой мощности при схемах 1 и 2 и  $\cos \varphi = 0,5$  использование приближается к нормальному трехфазному двигателю, но, однако, при малейшем отклонении от этого значения оно резко уменьшается.

3. Недостаточная перегрузочная способность. При рабочей емкости нормально  $\frac{M_{\max}}{M_N} = 1,20 \div 1,30$ . Правда, при необходимости можно приключать дополнительную емкость, что резко повышает перегрузочную способность, но это требует дополнительной мощности конденсаторов, которая во избежание перегрева обмоток должна приключаться лишь в моменты перегрузок.

Основные достоинства конденсаторных двигателей:

1. Питание от однофазной сети. Это в некоторых отраслях хозяйства (электрическая тяга, сельское хозяйство и т. п.) дает громадные преимущества в эксплоатации.

2. Хороший коэффициент мощности сети. При номинальной нагрузке и рабочей емкости  $\cos \varphi_l = 0,95 \div 1,0$ . При недогрузках  $\cos \varphi_l$  является упреждающим. Особо громадную роль этот фактор имеет в электрической тяге, где сильно облегчаются условия эксплоатации линии передачи.

3. Надежность в эксплоатации и простота управления. Конденсаторный двигатель по сравнению с другими, питаемыми от однофазной сети двигателями, является наиболее простым по конструкции, а следовательно, более надежным в эксплоатации.

Краткий теоретический анализ режима работы конденсаторных двигателей выдвигает их в ряд лучших двигателей переменного тока, питаемых от однофазной сети. Особо широкое применение они могут найти в электрической тяге, сельском хозяйстве и в мелких однофазных установках (вентиляторы, киноустановки и т. п.).

## ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Бамдас и Голдовский, Конденсаторный реактивный двигатель, «Электричество», № 18, 1936.
2. Г. Б. Меркин и В. И. Коновалов, О конденсаторных моторах. «Труды ЛИИ», № 1, 1936.
3. Н. М. Булаев, Исследование пуска и работы трехфазного асинхронного двигателя с конденсатором при питании его однофазным током. «Труды ЛИИ», 1937 (в печати).
4. М. Кронд, Berechnung von Einphasen-Kondensator-Motoren E. и M., Heft 12, 1934.
5. Р. Рихтер, Электрические машины. Т. II, ОНТИ, 1936.
6. К. Ф. Вагнер и Р. Д. Эванс, Метод симметричных составляющих, ОНТИ, 1936.
7. Л. Н. Закгейм и Г. Д. Николаева, Электролитические конденсаторы для пуска однофазных электродвигателей. «Вестник электропромышленности» № 10, октябрь 1935.
8. W. Schmitzky, Das Anlaufmoment des Einphasenmotors mit Hilfphase. «EGZ» N. 47, 1935.

# Основы теории конденсаторного электродвигателя

THEORETICAL PRINCIPLES OF A CAPACITOR-MOTOR

Б. И. Станиславский  
ВЭИ

КОНДЕНСАТОРНЫМ электродвигателем (Capacitor-Motor; Ek-Motor) обычно называют однофазный асинхронный двигатель, который наряду с основной обмоткой статора имеет вспомогательную, сдвинутую на  $\frac{\pi}{2}$  электрических градусов по отношению к основной обмотке. Для улучшения действия вспомогательной обмотки последовательно с ней включается конденсатор. Это увеличивает сдвиг фаз токов обеих обмоток, вследствие чего двигатель по своим свойствам приближается к многофазному.

Чаще всего встречаются схемы включения конденсаторного двигателя, изображенные на рис. 1. В схеме *a* конденсатор включен последовательно со вспомогательной обмоткой, и он служит как для пуска двигателя в ход, так и для работы. В схеме *b* конденсатор и вспомогательная обмотка предусмотрены только для пуска двигателя в ход; по достижении ротором известного числа оборотов цепь вспомогательной обмотки размыкается (часто автоматически), и в дальнейшем двигатель работает как однофазный. Наконец, схема *c* имеет два конденсатора, включенных параллельно. Пуск осуществляется при включенных двух конденсаторах; при достижении двигателем примерно  $\frac{2}{3}$  нормального числа оборотов, один из конденсаторов выключается, и двигатель работает уже при меньшей емкости в цепи вспомогательной обмотки.

Двигатели, выполненные по схемам *a*, *b* и *c*, называются соответственно: *a*) двигателем с конденсаторным пуском и работой (C-Motor), *b*) двигателем с конденсаторным пуском (AC-Motor) и *c*) двигателем с двойным конденсатором (CC-Motor).

Пусковые характеристики этих двигателей *a*, *b* и *c* в соответствии с нумерацией приведены на рис. 1 и 2 (жирная линия). Пунктиром на этом рисунке изображены кривые вращающих моментов этих двигателей при работе их по схеме обычного однофазного асинхронного двигателя.

Как видно из рис. 2, конденсаторный двигатель может иметь значительный пусковой момент, что выгодно отличает его от обычного однофаз-

ного, который из-за отсутствия пускового момента почти непригоден для широкого употребления.

Однако до последнего времени конденсаторный двигатель не получил достаточного распространения благодаря отсутствию на рынке легких и высококачественных конденсаторов. Только недавно в связи с появлением конденсаторов, удовлетворяющих поставленным требованиям, эти двигатели начали получать все большее употребление.

Общие уравнения двигателя<sup>1</sup>. Как уже было указано, конденсаторный двигатель представляет собой электромагнитную систему, имеющую две обмотки на статоре и многофазную обмотку (чаще беличью клетку) на роторе (рис. 3). Основной обмотке присвоим индекс *I*, вспомогательной — *III* и обмотке ротора — индекс *II*.

Рассмотрим происходящие в таком двигателе электромагнитные процессы.

Пульсирующий в обмотке *I* ток  $I_1$  создает пульсирующий же магнитный поток  $\Phi_1$ , который по известным правилам можно представить себе состоящим из двух вращающихся в противоположные стороны потоков половинной амплитуды:  $\Phi_{1f}$  — прямого и  $\Phi_{1b}$  — обратного (индексы соот-

<sup>1</sup> Все нижеизложенное, по существу, относится к общему случаю индукционной машины с двумя обмотками на статоре. Путем упрощения окончательных выражений можно получить, как частный случай, формулы для двухфазного асинхронного двигателя, а также и для обычного однофазного.

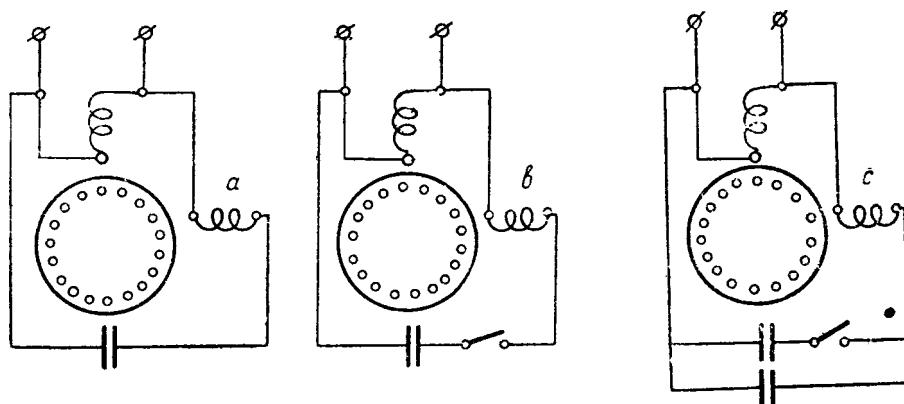


Рис. 1

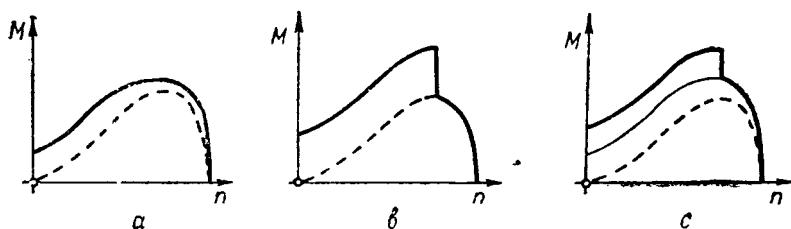


Рис. 2  
Вологодская областная универсальная научная библиотека  
www.booksite.ru

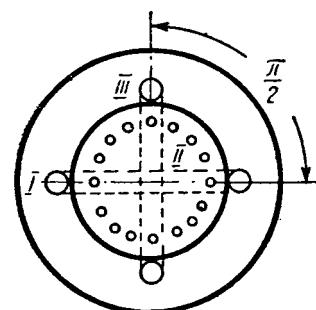


Рис. 3

ветствуют английским «forward» и «backward»). Точно так же пульсирующий поток обмотки III  $\Phi_3$  разлагаем на два вращающиеся потока  $\Phi_{3f}$  и  $\Phi_{3b}$ ). В роторе соответственно наводятся прямой ток  $I_{2f}$  и обратный  $I_{2b}$ , которые создают в свою очередь прямое и обратное вращающиеся поля.

Сумма всех прямых полей дает общее прямое поле  $\dot{\Phi}_f$ , сумма всех обратных — поле  $\dot{\Phi}_b$ . В каждой из обмоток оба поля наводят прямые и обратные э. д. с. Взаимодействие прямых и обратных э. д. с. с токами тех же обмоток создают противоположно направленные моменты. Результирующий момент определится как разность этих противоположных моментов.

При рассмотрении вопроса, как и обычно, магнитное сопротивление железа будем считать неизменным, а также для упрощения пренебрежем потерями в железе. Корректировать эти упрощения не представит особенного труда. Далее, изменение э. д. с., токов и потоков во времени будем считать синусоидальным.

Вращающиеся поля, создаваемые обмоткой  $I$ , будут:

$$\begin{aligned}\dot{\Phi}_{1f} &= \frac{I_1}{2} \frac{\sqrt{2} w_1}{2p} \frac{4}{\pi} \frac{1}{\rho_m}; \\ \dot{\Phi}_{1b} &= \frac{I_1}{2} \frac{\sqrt{2} w_1}{2p} \frac{4}{\pi} \frac{1}{\rho_m}.\end{aligned}\quad (1)$$

Здесь:

$I_1\sqrt{2}$  — вектор амплитудного значения тока;

$w_1$  — эффективное число витков;

$\rho_m$  — магнитное сопротивление пути потока.

При равномерном воздушном зазоре можно считать

$$\rho_m = \frac{\delta'}{0.4\pi l \tau}, \quad (2)$$

где  $\delta'$  — приведенный воздушный зазор (с учетом магнитного сопротивления железа),  $l$  — активная длина железа,  $\tau$  — полюсное деление. Все величины должны быть выражены в сантиметрах.

Вводя обозначение

$$k_1 = \frac{\sqrt{2}}{p\pi\rho_m} = \frac{\sqrt{2}0.4\pi l \tau}{p\delta'}, \quad (3)$$

можно (1) представить так:

$$\begin{aligned}\dot{\Phi}_{1f} &= k_1 w_1 I_1; \\ \dot{\Phi}_{1b} &= k_1 w_1 I_1.\end{aligned}\quad (4)$$

Примем направление вращения ротора по ходу часовой стрелки; положительные направления потоков<sup>2</sup> и направление вращения прямых и обратных полей показаны на рис. 4. В таком случае прямое поле обмотки III опережает прямое поле обмотки I на угол  $\frac{\pi}{2}$ . Обратное поле обмотки III от-

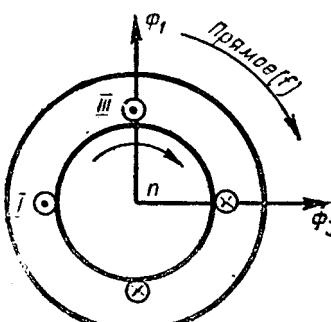


Рис. 4

стает от обратного поля обмотки I на  $\frac{\pi}{2}$ . Ориентируясь во времени по обмотке I, можно написать:

$$\begin{aligned}\dot{\Phi}_{3f} &= k_1 w_3 I_3 e^{+j\frac{\pi}{2}} = +j k_1 w_3 I_3; \\ \dot{\Phi}_{3b} &= k_1 w_3 I_3 e^{-j\frac{\pi}{2}} = -j k_1 w_3 I_3.\end{aligned}\quad (5)$$

Амплитуды прямого и обратного потоков, создаваемых токами ротора, не будут равны, так как сами токи не равны в силу различного полного сопротивления, которое им приходится преодолевать. Поэтому прямой и обратный потоки, создаваемые обмоткой ротора:

$$\begin{aligned}\dot{\Phi}_{2f} &= k_1 w_2 I_2 f; \\ \dot{\Phi}_{2b} &= k_1 w_2 I_2 b;\end{aligned}\quad (6)$$

где  $w_2$  — эффективное число витков фазы ротора;  $m_2$  — число фаз его;

$I_2f$  ( $I_2b$ ) — вектор прямого (обратного) тока ротора.

Полный прямой и обратный потоки:

$$\begin{aligned}\dot{\Phi}_f &= \dot{\Phi}_{1f} + \dot{\Phi}_{3f} + \dot{\Phi}_{2f}; \\ \dot{\Phi}_b &= \dot{\Phi}_{1b} + \dot{\Phi}_{3b} + \dot{\Phi}_{2b};\end{aligned}\quad (7)$$

или, используя ранее найденные зависимости потоков от токов (4), (5) и (6), можно найти выражения общего прямого и обратного потоков:

$$\begin{aligned}\dot{\Phi}_f &= k_1 w_1 (I_1 + j\bar{u} I_3 + I_2 f); \\ \dot{\Phi}_b &= k_1 w_1 (I_1 - j\bar{u} I_3 + I_2 b);\end{aligned}\quad (8)$$

где  $\bar{u} = \frac{w_3}{w_1}$ , а  $I_2 f$  и  $I_2 b$  — приведенные к обмотке I токи ротора — прямой и обратный.

Пользуясь этими последними формулами, можно найти э. д. с., индуцируемые в обмотках этими потоками.

Если ротор вращается в сторону прямого поля со скольжением  $s$ , то скольжение его относительно обратного поля будет  $2 - s$ . Электродвигущие силы, наводимые в его обмотке, определяются как величиною прямого или обратного поля, так и скольжением ротора относительно тех же полей. Иначе говоря:

$$\begin{aligned}\dot{E}_{2f} &= -j k_0 w_2 \dot{\Phi}_f s; \\ \dot{E}_{2b} &= -j k_0 w_2 \dot{\Phi}_b (2 - s),\end{aligned}\quad (9)$$

где

$$k_0 = \frac{\omega}{\sqrt{2}} 10^{-8} \quad \text{и} \quad \omega = 2\pi f.$$

С другой стороны, между э. д. с. обмотки ротора  $\dot{E}_{2f}$  и  $\dot{E}_{2b}$  и токами, вызываемыми ими, существуют соотношения:

$$\begin{aligned}\dot{E}_{2f} &= I_2 f [r_2 + jx_2 s]; \\ \dot{E}_{2b} &= I_2 b [r_2 + jx_2 (2 - s)],\end{aligned}\quad (10)$$

где  $r_2$  — активное сопротивление фазы обмотки ротора;

$x_2$  — индуктивное при  $f_2 = f_1$ .

Приравнивая правые части выражений (9) и (10) и произведя соответствующие преобразования, нетрудно вывести, что

$$\dot{\Phi}_f = j I_2 f \frac{r_2 + jx_2 s}{k_0 w_2 s}; \quad (11)$$

$$\dot{\Phi}_b = j I_2 b \frac{r_2 + jx_2 (2 - s)}{k_0 w_2 (2 - s)}.$$

Решая это уравнение совместно с (8), получим:

$$\begin{aligned} i'_{2f} &= -jx_m \frac{i_1 + j\bar{a}i_3}{z'_{2f} + jx_m}; \\ i'_{2b} &= -jx_m \frac{i_1 - j\bar{a}i_3}{z'_{2b} + jx_m}. \end{aligned} \quad (12)$$

В формулах (12)

$$x_m = k_1 k_0 w_1^2$$

— магнитный реактанц обмотки I от вращающегося поля, а  $z'_{2f}$  и  $z'_{2b}$  — приведенные к этой обмотке импедансы — прямому и обратному току ротора:

$$\begin{aligned} z'_{2f} &= \frac{w_1^2}{w_2^2 m_3} \left[ \frac{r'_2}{s} + jx'_2 \right]; \\ z'_{2b} &= -\frac{w_1^2}{w_2^2 m_2} \left[ \frac{r'}{2-s} + jx'_2 \right]. \end{aligned} \quad (13)$$

Прямое и обратное общие поля вращаются относительно обмотки I с постоянной скоростью, соответствующей синхронному числу оборотов в противоположные стороны. Наводимые этими полями э. д. с. по величине и фазе зависят только от величины и фазы индуктирующих потоков.

Пользуясь выражениями для потоков (8) и формулами (12), можно определить эти э. д. с.

$$\begin{aligned} \dot{E}_{1f} &= -Z_f [i_1 + j\bar{a}i_3]; \\ \dot{E}_{1b} &= -Z_b [i_1 - j\bar{a}i_3], \end{aligned} \quad (14)$$

где

$$\begin{aligned} Z_f &= jx_m \frac{z'_{2f}}{z'_{2f} + jx_m}; \\ Z_b &= jx_m \frac{z'_{2b}}{z'_{2b} + jx_m}. \end{aligned} \quad (15)$$

Сейчас уже можно составить баланс напряжения э. д. с. и падения напряжения для обмотки I:

$$\dot{U}_1 = \dot{i}_1 (r_1 + jx_1) + Z_f [i_1 + j\bar{a}i_3] + Z_b [i_1 - j\bar{a}i_3]. \quad (16)$$

Здесь:  $\dot{U}_1$  — вектор напряжения на зажимах этой обмотки;  $r_1$  и  $x_1$  — активное и индуктивное сопротивления ее.

Переходя к определению э. д. с. обмотки III, необходимо отметить, что э. д. с., индуктируемая в ней прямым полем, будет отставать по фазе от э. д. с., обусловленной тем же полем в обмотке I, на угол  $\frac{\pi}{2}$ . Напротив, из э. д. с., создаваемых обратным полем, опережающая из них будет наводиться в обмотке I.

Это станет ясным, если вспомнить, что положительным направлением витков мы считаем для обмотки I «вверх», и для обмотки III — «вправо» (рис. 5).

Таким образом:

$$\dot{E}_{3f} = -j \frac{\omega}{\sqrt{2}} w_3 \dot{\Phi}_f 10^{-8} e^{-j \frac{\pi}{2}}; \quad (17)$$

$$\dot{E}_{3b} = -j \frac{\omega}{\sqrt{2}} w_3 \dot{\Phi}_b 10^{-8} e^{+j \frac{\pi}{2}},$$

или после преобразования:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{3f} &= +j a Z_f (i_1 + j\bar{a}i_3); \\ \dot{E}_{3b} &= -j Z_b (i_1 - j\bar{a}i_3). \end{aligned} \quad (18)$$

Для уравнения баланса э. д. с., напряжения и падения напряжения обмотки III воспользуемся приведенными к обмотке I ее сопротивлениями:

$$r'_3 = \frac{r_3}{\bar{a}^2} \quad \text{и} \quad x'_3 = \frac{x_3}{\bar{a}^2},$$

и приведенным к той же обмотке последовательно включенным с обмоткой III емкостным сопротивлением:

$$x'_c = \frac{x_c}{\bar{a}^2}.$$

В таком случае

$$\dot{U}_3 = \dot{i}_3 \bar{a}^2 [r'_3 + j(x'_3 - x'_c)] - j\bar{a} Z_f (i_1 + j\bar{a}i_3) + j\bar{a} Z_b (i_1 - j\bar{a}i_3), \quad (19)$$

где  $\dot{U}_3$  — вектор напряжения на зажимах обмотки III.

Чтобы получить более простые соотношения для напряжений и токов в обмотках, введем некоторые обозначения.

Пользуясь (15), находим:

$$\begin{aligned} R_f &= \frac{\frac{r'_2}{s} x_m^2}{\left(\frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x'_2 + x_m)^2}; \\ X_f &= x_m \frac{\left(\frac{r'_2}{s}\right)^2 + x'_2 (x'_2 + x_m)}{\left(\frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x'_2 + x_m)^2}; \end{aligned}$$

$$R_b = \frac{\frac{r'_2}{2-s} x_m^2}{\left(\frac{r'_2}{2-s}\right)^2 + (x'_2 + x_m)^2} \quad (20)$$

$$X_b = x_m \frac{\left(\frac{r'_2}{2-s}\right)^2 + x'_2 (x'_2 + x_m)}{\left(\frac{r'_2}{2-s}\right)^2 + (x'_2 + x_m)^2}.$$

В связи с этим (16) и (19) примут вид<sup>3</sup>:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{i}_1 (\bar{R}_1 + j\bar{X}_1) + j\bar{a}i_3 (\bar{R}_0 + j\bar{X}_0); \\ \dot{U}_3 &= \bar{a}^2 i_3 [\bar{R}_3 + j(\bar{X}_3 - x'_c)] - j\bar{a}i_1 (\bar{R}_0 + j\bar{X}_0). \end{aligned} \quad (21)$$

Здесь:

$$\begin{aligned} \bar{R}_1 &= r_1 + R_f + R_b; \quad \bar{X}_1 = x_1 + X_f + X_b; \quad \bar{X}_0 = X_f - X_b; \\ \bar{R}_3 &= r'_3 + R_f + R_b; \quad \bar{X}_3 = x'_3 + X_f + X_b; \quad \bar{R}_0 = R_f - R_b. \end{aligned}$$

Из совместного решения уравнений (21) можно найти выражения для токов. В случае питания обеих обмоток от одной и той же сети:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_3 = \dot{U}, \quad (22)$$

<sup>3</sup> Подставив во все предыдущие формулы  $\dot{U}_3 = j\dot{U}_1$ ,  $\bar{a} = 1$ ,  $z_3 = z_1$  и  $x_c = 0$ , получим формулы для двухфазного симметричного двигателя. Подставив  $\dot{U}_3 = 0$ , или  $\bar{a} = 0$ , или  $i_3 = 0$ , получим формулы, характеризующие обычный однофазный двигатель.

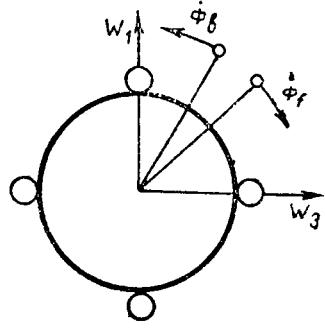


Рис. 5

и тогда:

Действительно, выражение для тока  $\dot{I}_{3n}$  при имеющемся емкостном реактанце будет иметь вид

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{\dot{U}}{u^2} \frac{u^2 [\bar{R}_3 + j(\bar{X}_3 - X_{c'})] - j\bar{u} [\bar{R}_0 + jX_0]}{[\bar{R}_1 + j\bar{x}_1] [\bar{R}_3 + j(\bar{X}_3 - x_{c'})] - [\bar{R}_0 + jX_0]^2}; \\ \dot{I}_3 &= \frac{\dot{U}}{u^2} \frac{[\bar{R}_1 + j\bar{X}_1] + j\bar{u} [\bar{R}_0 + j\bar{X}_0]}{[\bar{R}_1 + j\bar{X}_1] [\bar{R}_3 + j(\bar{X}_3 - x_{c'})] - [\bar{R}_0 + jX_0]^2}. \end{aligned} \quad (23)$$

Полный ток машины

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_3,$$

т. е.

$$\dot{I}_{3n} = \frac{1}{A + B \xi}, \quad (27)$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{u^2} \frac{[\bar{R}_1 + u^2 \bar{R}_3] + j[\bar{X}_1 + u^2 (\bar{X}_3 - x_{c'})]}{[\bar{R}_1 + j\bar{x}_1] [\bar{R}_3 + j(\bar{X}_3 - x_{c'})] - [\bar{R}_0 + jX_0]^2}. \quad (24)$$

Как видно из (23), в процессе работы двигателя обе обмотки статора связаны между собой электромагнитно, вследствие чего параметры одной обмотки сильно влияют на режим работы другой. Для получения наивыгоднейшего режима, очевидно, необходимо наличие определенной зависимости между параметрами обеих обмоток. Как известно, такой режим соответствует «уравновешенному» состоянию двигателя, т. е. такому случаю, когда угол сдвига фаз между токами  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_3$  равен  $\frac{\pi}{2}$ .

Этому сдвигу соответствует вполне определенное отношение числа витков обеих обмоток<sup>4</sup>:

$$\bar{u} = \frac{w_1}{w_3} = \operatorname{ctg} \varphi.$$

**Пусковой момент.** Особый интерес представляет исследование пускового момента в силу того, что аналитическое выражение для него имеет одинаковый вид для всех трех схем (рис. 1).

В начальный момент пуска, когда ротор еще неподвижен, прямое и обратное поля наводят в роторе токи одинаковой частоты. Поэтому

$$R_{fn} = R_{bn}; X_{fn} = X_{bn}$$

и

$$R_{on} = 0; X_{on} = 0.$$

Все величины, относящиеся к начальному моменту пуска, будем обозначать индексом  $n$ .

Выражение (23) для токов примет вид:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{1n} &= \frac{\dot{U}}{\bar{R}_{1n} + j\bar{X}_{1n}}; \\ \dot{I}_{3n} &= \frac{\dot{U}}{u^2 [\bar{R}_{3n} + j(\bar{X}_{3n} - x_{c'})]}. \end{aligned} \quad (25)$$

Как видно из формул (25), в начальный момент пуска (короткое замыкание) токи обмоток статора не взаимодействуют, иначе говоря, обе обмотки статора работают самостоятельно.

Вектор полного пускового тока:

$$\dot{I}_n = \dot{I}_{1n} + \dot{I}_{3n} = \frac{\dot{U}}{\bar{R}_{1n} + j\bar{X}_{1n}} + \frac{\dot{U}}{u^2 [\bar{R}_{3n} + j(\bar{X}_{3n} - x_{c'})]}. \quad (26)$$

Очевидно, что при изменении величины емкостного сопротивления  $x_{c'}$  будет изменяться величина и фаза только тока  $\dot{I}_{3n}$ . Нетрудно видеть, что при этом конец вектора  $\dot{I}_{3n}$  описывает окружность.

$$\text{где } A = \frac{u^2 [\bar{R}_{3n} + j\bar{X}_{3n}]}{\dot{U}} \text{ и } B = -j \frac{u^2 x_{c'}'}{\dot{U}}.$$

Приняв, что вектор  $\dot{U}$  совпадает с положительным направлением действительной оси, можно построить круговую диаграмму для вектора  $\dot{I}_{3n}$ . Геометрическое место концов этого вектора  $\dot{I}_{3n}$  при изменении параметра  $x_{c'}$ , как это видно (27), есть окружность, проходящая через начало координат. Точка диаграммы, противолежащая началу координат и соответствующая значению  $x_{c'n} = x_{3n}$ , вполне дает возможность построить эту окружность; в этом случае вектор

$$\dot{I}_{3n} = \frac{\dot{U}}{u^2 \bar{R}_{3n}} \quad (28)$$

совпадает с положительной осью и равен диаметру окружности, так как он представляет наибольшее значение  $\dot{I}_{3n}$  из всех возможных при постоянных параметрах  $\bar{R}_{3n}$  и  $\bar{X}_{3n}$  (рис. 6). Помня, что  $\dot{I}_n = \dot{I}_{1n} + \dot{I}_{3n}$ , можно построить полную круговую диаграмму для начального пускового тока (рис. 7). Выясним влияние емкости на величину пускового момента.

Вращающий момент пропорционален действующей мощности  $P$ . Последняя же, как известно, равна действительной части произведения э. д. с. на комплекс, сопряженный току.

Поэтому вращающий момент в начале пуска

$$M_n = \frac{2}{\pi 9,81 f} P I_{1n} I_{3n} \bar{u} \frac{r'_2}{r'_2 + (x'_2 + x_n)^2} x_M^2 \sin(\dot{I}_{1n} \dot{I}_{3n}) \text{ mkg} \quad (29)$$

Рассматривая это выражение, нетрудно видеть, что начальный пусковой момент при варьировании параметра  $x'_{cn}$  изменится вместе с

$$I_{3n} \sin(\dot{I}_{1n} \dot{I}_{3n}). \quad (30)$$

Обращаясь снова к пусковой диаграмме (рис. 8), можно видеть, что пусковой момент характеризуется длиной отрезка

$$\bar{ab} = I_{3n} \sin \alpha,$$

где  $\alpha$  — угол между  $\dot{I}_{1n}$  и  $\dot{I}_{3n}$ .

Можно также сказать, что пусковой момент

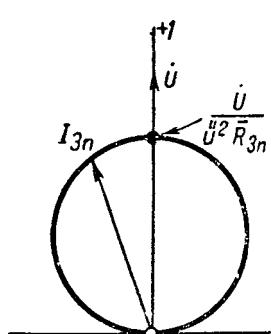


Рис. 6

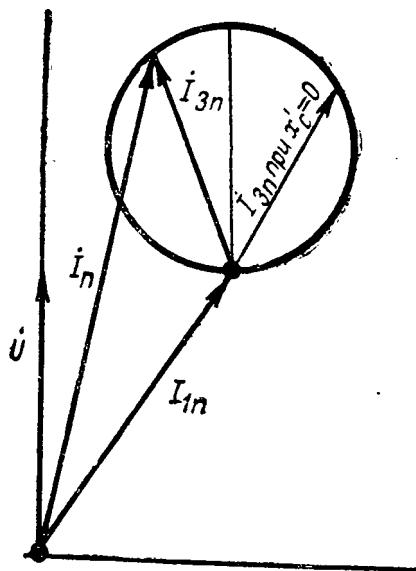


Рис. 7

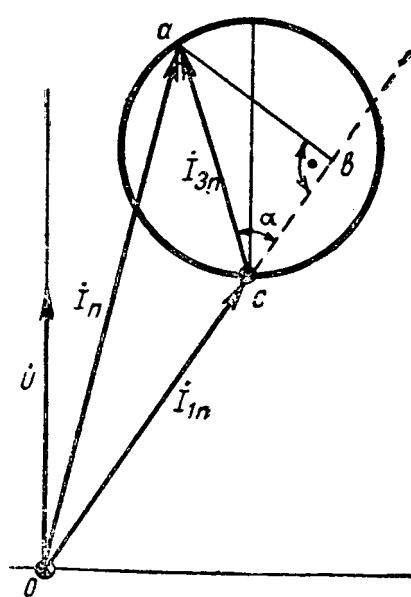


Рис. 8

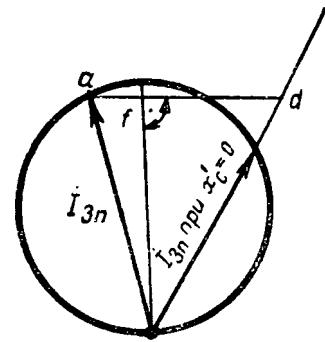


Рис. 9

пропорционален площади треугольника  $oac$ , так как основание этого треугольника  $I_{in}$  не зависит от  $x'_{cn}$ .

Очевидно наибольший пусковой момент соответствует такому значению параметра  $x'_{cn}$ , при котором вектор  $I_{3n}$  займет такое положение, что линия  $ab$  пройдет через центр окружности.

Из вышесказанного можно заключить, что на величину начального пускового момента влияют два фактора (при заданных параметрах основной обмотки и обмотки ротора): 1) диаметр окружности пускового тока и 2) угол сдвига фазы этого же тока.

Первое из этих условий характеризуется величиной (в масштабе токов):

$$D = \frac{U}{\bar{u}^2 R_{3n}} = \frac{U}{\bar{u}^2 \left[ \frac{r_3^2}{r_3^2 + 2x_{cn}^2} \frac{r_2'}{r_2'^2 + (x_2' + x_{cn})^2} \right]} = \\ = \frac{U}{r_3 + \bar{u}^2 x_{cn} \frac{r_2'}{r_2'^2 + (x_2' + x_{cn})^2}}, \quad (31)$$

где  $r_3$  — сопротивление обмотки III.

Следовательно, наибольший начальный пусковой момент, какой может быть получен при подборе различных емкостей, находится в обратной зависимости от активного сопротивления обмотки III и квадрата отношения числа витков обмотки III и обмотки I.

Это должно быть одним из руководящих положений при выборе числа витков вспомогательной обмотки для пуска. Выбор емкости, соответствующей второму условию, может быть произведен графическим путем — построением круговой диаграммы пуска; при этом величина необходимой емкости может быть определена, как (рис. 9):

$$x'_{cn} = X_{3n} \frac{\bar{a}d}{\bar{f}d}. \quad (32)$$

Отрезок  $\bar{ad}$  — перпендикуляр, опущенный из конца вектора  $I_{3n}$  на диаметр окружности и продолженный до пересечения с линией вектора  $I_{3n}$  при  $x'_{cn} = 0$ ; этот вектор

$$I_{3n} \Big|_{x'_{cn}=0} = \bar{u}^2 [R_{3n} + jX_{3n}] \quad (33)$$

Действительное реактивное сопротивление конденсатора

$$x_{cn} = \bar{u}^2 x'_{cn}. \quad (34)$$

## ЛИТЕРАТУРА

1. J. Biermans, Über einen Einphasen. Inductosmotor AfE 1926, B. XVII, S. 519.
2. F. Pung a, Graphische Behandlung des Einphaseninductosmotor mit Kapazität und Hilfphase. AfE, 1927, B. XVIII, S. 267.
3. B. Bailey, The Condenser Motor. Tr. AIEE, 1929 april, p. 596.
4. H. C. Specht, The Fundamental Theory of the Capacitor Motor. Tr. AIEE, 1929 april, p. 607.
5. W. Morril, The Revolving Field Theory of the Capacitor Motor. Tr. AIEE, 1924 april, p. 614.
6. H. Wolf, Einphasen Induction-motor mit dem Kondensatoren in den Hilfphase. E и M, 1930, S. 1623.
7. W. Thoma, Über des anlaufmoment des asynchronen Einphasen Motors mit Hilfphase. AfE, 1932, B. XXVI, S. 851.
8. P. H. Trickey, Design of Capacitor Motor for Balanced Operation. Tr. AIEE, 1932 sept., p. 780.
9. M. Kronl, Berechnung von Einphasen Kondensatormotoren. E и M, 1934, B. 52, H. № 12.
10. A. Schanz, Momentenbildung und Läuferverluste in Einphasen Kondensatormotoren. E и M, 1934, B. 52, H. № 29.
11. F. Müller, Kondensatormotoren. AEG-Mitt., 1934, № 3.
12. Barlett, The Single Phase Capacitor Motor. El. Review, 1933, vol. 113, № 2906.

# Питание однофазным током трехфазного асинхронного электродвигателя с конденсатором<sup>1</sup>

THREE-PHASE ASYNCHRONOUS CAPACITOR MOTOR WITH SINGLE-PHASE SUPPLY

Н. М. Булаев

Ленинградский индустриальный институт

В литературе достаточно подробно освещены пуск и работа однофазных двухобмоточных двигателей с конденсатором на однофазном токе. Голного же анализа пуска и работы нормального трехфазного асинхронного двигателя с конденсатором на однофазном токе пока нет<sup>2</sup>. Настоящая работа поставила себе задачей восполнить этот пробел и дать подтвержденную опытом теорию такого двигателя, исходя из метода симметричных координат с приложением его к трехфазной схеме.

Это исследование может, кроме теоретического, иметь также и большое практическое значение в применении трехфазных двигателей там, где существуют технические или экономические трудности подвода к двигателю трехфазного тока: сельскохозяйственные установки, передвижные и временные установки.

Особенный интерес это может представить в применении трехфазных двигателей в электрической тяге, где с использованием земли в качестве второго провода возможно обеспечить питание двигателя одним троллейным проводом от однофазной или трехфазной высоковольтной магистрали.

Общее. Трехфазный двигатель с конденсатором, включенный по любой из схем на однофазный ток, будет иметь асимметричное распределение напряжений и токов по фазным обмоткам. В наиболее выгодных условиях эксплуатации двигатель, очевидно, окажется тогда, когда режим работы его будет ближе всего подходить к режиму нормальной работы его на трехфазном токе.

В этом исследовании подвергнута анализу одна из возможных схем включения двигателя, показанная на рис. 1. Совместная векторная диаграмма токов и напряжений для этого случая изображена на рис. 2.

Пользуясь методом симметричных координат, можно данную несимметричную трехфазную систему токов и напряжений разложить на три симметричные трехфазные системы токов и напряжений. Суммирование режимов работы, создаваемых каждой системой, позволяет определить все пусковые и рабочие характеристики двигателя.

$$i_a = \dot{U} \frac{3(Z_1 + Z_2) - j\sqrt{3}(Z_1 - Z_2)}{(Z_0 + 3Z_k)(Z_1 + Z_2) + 4Z_1Z_2},$$

$$\dot{U}_a = \dot{U} \frac{Z_0(Z_1 + Z_2) + 4Z_1Z_2 + j\sqrt{3}Z_k(Z_1 - Z_2)}{(Z_0 + 3Z_k)(Z_1 + Z_2) + 4Z_1Z_2};$$

$$i_b = \dot{U} \frac{(Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_k) + j\sqrt{3}(Z_1 - Z_2)}{(Z_0 + 3Z_k)(Z_1 + Z_2) + 4Z_1Z_2};$$

$$\dot{U}_b = \frac{\sqrt{3}}{2} \dot{U} \frac{(Z_0 + Z_k)[\sqrt{3}(Z_1 + Z_2) - j(Z_1 - Z_2)]}{(Z_0 + 3Z_k)(Z_1 + Z_2) + 4Z_1Z_2}$$

$$i_c = \dot{U} \frac{-(Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_k) - j\sqrt{3}(Z_1 - Z_2)}{(Z_0 + 3Z_k)(Z_1 + Z_2) + 4Z_1Z_2};$$

$$\dot{U}_c = \frac{1}{2} \dot{U} \frac{(Z_1 + Z_2)(Z_0 - 3Z_k) - 8Z_1Z_2 - j\sqrt{3}(Z_1 - Z_2)(Z_0 + Z_k)}{(Z_0 + 3Z_k)(Z_1 + Z_2) + 4Z_1Z_2}.$$

Ток, потребляемый двигателем из сети

$$I = i_a + i_b = \dot{U} \frac{Z_0 + 4(Z_1 + Z_2) + 3Z_k}{(Z_0 + 3Z_k)(Z_1 + Z_2) + 4Z_1Z_2}.$$

Напряжение на зажимах конденсатора

$$\dot{U}_k = \dot{U} \frac{3(Z_1 + Z_2) - j\sqrt{3}(Z_1 - Z_2)}{(Z_0 + 3Z_k)(Z_1 + Z_2) + 4Z_1Z_2} Z_k = i_a Z_k.$$

Из изложенного видно, что при любом скольжении двигателя  $s$  можно определить все токи и все напряжения, если при данном  $s$  известны сопротивления фазы двигателя  $Z_0$ ,  $Z_1$ ,  $Z_2$  и конденсатора  $Z_k$ .

В трехфазных двигателях нормального выполнения  $Z_0$  почти не зависит от скольжения, т. е.  $Z_0 \approx \text{const}$ , и оно легко определяется опытным путем.

<sup>1</sup> Работа была выполнена автором по заданию проф. Д. А. Завалишина, ссылающегося на нее на заседании Транспортной комиссии Академии наук СССР в прениях по докладу проф. В. К. Кулебакина.

<sup>2</sup> Перечень литературы дан в конце статьи.

Исходя из диаграммы рис. 2, можно составить следующие три независимые уравнения:

$$i_0(Z_0 + Z_k) + i_1(Z_1 + Z_k) + i_2(Z_2 + Z_k) = \dot{U}; \quad (1)$$

$$i_0Z_0 + a^2i_1Z_1 + a^2i_2Z_2 - i_0Z_0 - ai_1Z_1 - a^2i_2Z_2 = \dot{U}; \quad (2)$$

$$i_0 + ai_1 + a^2i_2 = -(i_0 + a^2i_1 + ai_2), \quad (3)$$

где  $i_0$ ,  $i_1$  и  $i_2$  — симметричные составляющие токов нулевой, прямой и обратной последовательности;

$Z_0$ ,  $Z_1$  и  $Z_2$  — комплексы полного сопротивления фазы двигателя токам нулевой, прямой и обратной последовательности;

$Z_k$  — сопротивление конденсатора;

$a = e^{j120^\circ}$  и  $a^2 = e^{j240^\circ}$  — операторы последовательности;

$\dot{U}$  — напряжение сети.

Решение этой системы уравнений позволяет непосредственно по параметрам машины и сопротивлению конденсатора определить симметричные составляющие токов и напряжений при любом режиме работы двигателя:

$$i_0 = \frac{\dot{U}}{\sqrt{3}} \frac{\sqrt{3}(Z_1 + Z_2) - j(Z_1 - Z_2)}{(Z_0 + 3Z_k)(Z_1 + Z_2) + 4Z_1Z_2}; \quad \dot{U}_0 = i_0 Z_0;$$

$$i_1 = \frac{\dot{U}}{\sqrt{3}} \frac{2\sqrt{3}Z_2 + j(Z_0 + 2Z_2 + 3Z_k)}{(Z_0 + 3Z_k)(Z_1 + Z_2) + 4Z_1Z_2}; \quad \dot{U}_1 = i_1 Z_1;$$

$$i_2 = \frac{\dot{U}}{\sqrt{3}} \frac{2\sqrt{3}Z_1 - j(Z_0 + 2Z_1 + 3Z_k)}{(Z_0 + 3Z_k)(Z_1 + Z_2) + 4Z_1Z_2}; \quad \dot{U}_2 = i_2 Z_2.$$

Зная токи  $i_0$ ,  $i_1$  и  $i_2$  и напряжения  $U_0$ ,  $U_1$  и  $U_2$ , можно определить легко действительные токи и напряжения двигателя:

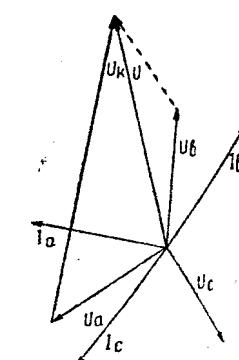
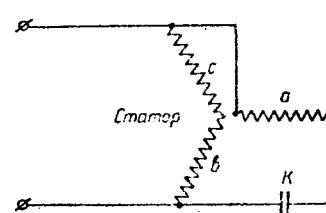
$$i_a = \dot{U} \frac{Z_0(Z_1 + Z_2) + 4Z_1Z_2 + j\sqrt{3}Z_k(Z_1 - Z_2)}{(Z_0 + 3Z_k)(Z_1 + Z_2) + 4Z_1Z_2};$$

$$i_b = \frac{\sqrt{3}}{2} \dot{U} \frac{(Z_0 + Z_k)[\sqrt{3}(Z_1 + Z_2) - j(Z_1 - Z_2)]}{(Z_0 + 3Z_k)(Z_1 + Z_2) + 4Z_1Z_2}$$

$$i_c = \frac{1}{2} \dot{U} \frac{(Z_1 + Z_2)(Z_0 - 3Z_k) - 8Z_1Z_2 - j\sqrt{3}(Z_1 - Z_2)(Z_0 + Z_k)}{(Z_0 + 3Z_k)(Z_1 + Z_2) + 4Z_1Z_2}.$$

$Z_2$  также почти не зависит от скольжения  $U$ , так как  $s$  мало, и можно допустить, что скольжения тормозного режима  $2 - s \approx 2$ . Тогда  $Z_2 \approx \text{const}$  и может быть легко рассчитано и определено опытно.

$Z_1$  выражается аналитически в зависимости от  $s$  и параметров машины, исходя из эквивалентной схемы для нормальной трехфазной машины; также можно найти его еще



графически по круговой диаграмме данного двигателя в трехфазном режиме.

Если точно учитывать зависимость  $Z_2$  от  $s$ , то при этом даже симметричные составляющие токов будут иметь вид:

$$i_i = \frac{U - a_i s + \beta_i s + \gamma_i s^2}{a_i' + \beta_i' s + \gamma_i' s^2},$$

т. е. уравнения бициркулярных кривых, где  $a_i, \beta_i, \gamma_i, a_i', \beta_i', \gamma_i'$  — сложные комплексные выражения.

Определение же действительных токов и напряжений будет сопряжено с еще большими трудностями. Эти формулы могут иметь только чисто теоретическое значение, практически же ими пользоваться трудно и нецелесообразно.

Допущение же того, что  $2 - s \approx 2$  практически мало влияет на точность определения величин, но приводит к тому, что  $Z_2 \approx \text{const}$ . Опыты подтверждают сказанное. Если поэтому не учитывать зависимости  $Z_2$  от  $s$ , то все вышеприведенные уравнения для токов и напряжений весьма упрощаются. Они будут зависеть только от  $Z_1$ , зависящего в свою очередь от  $s$ .

Все уравнения будут иметь вид:

$$U \frac{A_i + B_i s}{C_i + D_i s},$$

т. е. получатся уравнения кругов, которые, определяя радиусы положения центров, могут быть построены.

На рис. 3 представлены круговая диаграмма двигателя при его нормальном трехфазном режиме и все круги токов этого двигателя при работе его с конденсатором по схеме рис. 1.

Рабочие характеристики двигателя. Трехфазная система токов и напряжений нулевой последовательности будет вызывать только добавочные потери мощности в двигателе и ухудшать его  $\cos \varphi$ . В создании момента она участвовать не будет.

Трехфазная система токов и напряжений прямой последовательности воспроизведет режим работы нормального трехфазного двигателя при нормальном питании его. В этом случае подводимое напряжение следует только считать переменным, равным каждый раз симметричной составляющей системы напряжений прямой последовательности.

Трехфазная система токов и напряжений обратной последовательности будет создавать тормозной режим, аналогичный тормозному режиму трехфазной машины при нормальном ее питании. Для этой последовательности подведенное напряжение переменно и равно в каждом случае симметричной составляющей напряжений обратной последовательности.

Вращающий момент  $M_1$ , обусловленный системой прямой последовательности, при любом  $s$  может быть определен по обычной формуле момента для трехфазного двигателя с подстановкой в него токов и напряжений этой последовательности.

Тормозной момент  $M_2$ , создаваемый системой обратной последовательности, может быть найден по той же формуле момента для трехфазного двигателя с подстановкой в нее соответствующих токов и напряжений системы обратной последовательности и скольжения тормозного режима  $2 - s \approx 2$  вместо  $s$ .

Тогда результирующий момент

$$M = M_1 - M_2.$$

Зная моменты систем и определив обычным для асинхронных машин способом все потери, можно аналитически определить все характеристики работы двигателя.

Подведенная мощность

$$P_1 = P_0 + P'_1 + P''_1,$$

где  $P_0 = 3I_0^2 r_0$ ,

$r_0$  — активное сопротивление фазы статора для токов нулевой последовательности (токов нулевой последовательности в роторе не будет).

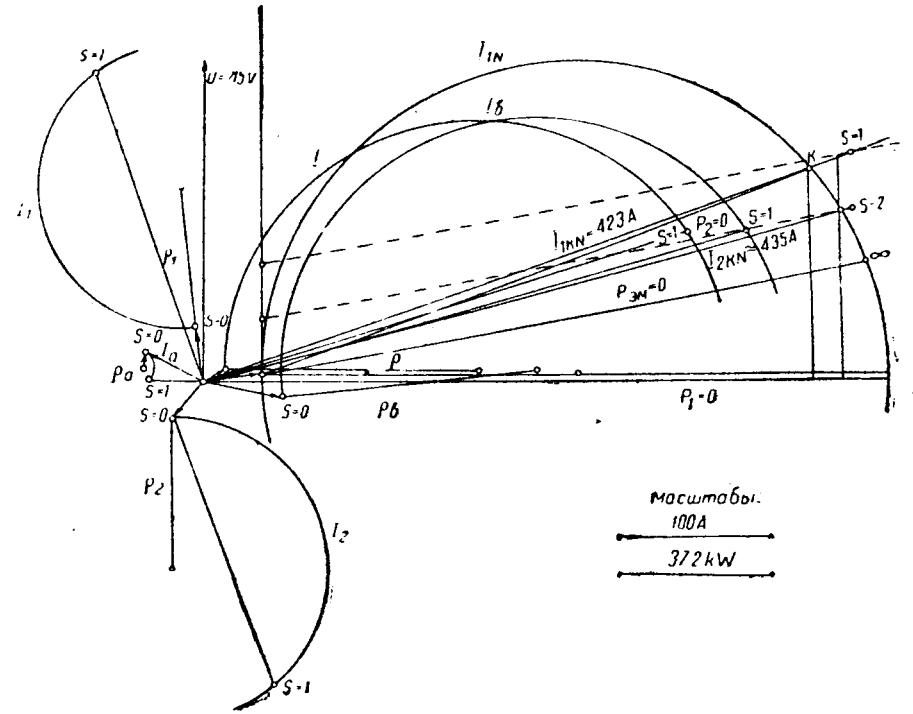


Рис. 3. Круговая диаграмма двигателя «Вольта» в нормальном режиме и кривые токов при работе его с конденсатором

$$(Z_k \approx 6,2 e^{-j90^\circ}; Z_0 \approx 0,47 e^{j81,5^\circ}; Z_2 \approx 0,3 e^{j76^\circ})$$

Полезная механическая мощность

$$P_2 = P'_2 - P''_2;$$

$$\eta = \frac{P'_2 - P''_2}{P'_1 + P''_1 + P_0}; \quad \cos \varphi = \frac{P'_1 + P''_1 + P_0}{UI},$$

где  $P'_1$  и  $P'_2$  — подведенная и полезная мощности системы прямой последовательности;

$P''_1$  и  $P''_2$  — подведенная из сети и механическая тормозная мощности системы обратной последовательности.

В результате будем иметь полную возможность аналитического расчета рабочих характеристик двигателя. При этом оказывается, что в полной мере можно использовать в этом расчете как тормозной, так и двигательный режим и трехфазной машины.

Наиболее легким оказывается графо-аналитический способ расчета рабочих характеристик. Круговая диаграмма трехфазной машины исчерпывающе определяет характеристики как двигательного, так и тормозного режима ее при неизменном подведенном напряжении сети.

В нашем случае при разных значениях  $s$  напряжения систем прямой и обратной последовательности будут различны.

Поэтому все величины, определяемые по круговой диаграмме при данном  $s$ , следует пересчитать пропорционально квадрату отношений напряжений или токов, т. е.

$$M_1 = M_{1N} \left( \frac{U_1}{U_{1N}} \right)^2 = M_{1N} \left( \frac{I_1}{I_{1N}} \right)^2,$$

$$\text{где } U_{1N} = \text{const} = \frac{U}{\sqrt{3}}; \quad M_2 = M_{2N} \left( \frac{U_2}{U_{2N}} \right)^2 = M_{2N} \left( \frac{I_2}{I_{2N}} \right)^2,$$

$$M_{2N} \approx \text{const}; \quad U_{2N} = U_{1N} = \text{const}; \quad M = M_1 - M_2;$$

$$P'_1 = P_{1N} \left( \frac{U_1}{U_{1N}} \right)^2 = P_{1N} \left( \frac{I_1}{I_{1N}} \right)^2, \quad I_{2N} \approx \text{const};$$

$$P''_1 = P''_{1N} \left( \frac{U_3}{U_{2N}} \right)^2 = P''_{1N} \left( \frac{I_2}{I_{2N}} \right)^2,$$

$$\text{где } P''_{1N} \approx \text{const};$$

$$P_1 = P'_1 + P''_1 + P_0$$

$$P'_2 = P'_{2N} \left( \frac{U_1}{U_{1N}} \right)^2 = P'_{2N} \left( \frac{I_1}{I_{1N}} \right)^2;$$

$$P''_2 = P''_{2N} \left( \frac{U_2}{U_{2N}} \right)^2 = P''_{2N} \left( \frac{I_2}{I_{2N}} \right)^2; \quad P''_{2N} \approx \text{const};$$

$$P_2 = P'_2 - P''_2.$$

Все величины с индексом  $N$  относятся к нормальному трехфазному режиму при тех же  $s$  и  $Z_1$  и взяты по круговой диаграмме.

Экспериментальная проверка правильности всего вышеизложенного приводит почти к полному совпадению расчетных характеристик работы двигателя с опытными, что свидетельствует о верности теоретических суждений.

### Пусковые моменты и наивыгоднейшие режимы пуска и работы

При пуске двигателя в ход  $Z_1 = Z_2$ , так как в этом случае  $s = 1$ . Тогда, применяя приведенные выше уравнения для симметричных составляющих токов и напряжений, будем иметь:

$$i_0 = \frac{\dot{U}}{Z_0 + 2Z_1 + 3Z_k}; \quad U_0 = i_0 Z_0;$$

$$i_1 = \frac{\dot{U}}{\sqrt{3}} \frac{2\sqrt{3}Z_1 + j(Z_0 + 2Z_1 + 3Z_k)}{2Z_1(Z_0 + 2Z_1 + 3Z_k)}; \quad U_1 = i_1 Z_1;$$

$$i_2 = \frac{\dot{U}}{\sqrt{3}} \frac{2\sqrt{3}Z_1 - j(Z_0 + 2Z_1 + 3Z_k)}{2Z_1(Z_0 + 2Z_1 + 3Z_k)}; \quad U_2 = i_2 Z_2.$$

Действительно токи в двигателе будут:

$$i_a = \frac{3\dot{U}}{Z_0 + 2Z_1 + 3Z_k} = 3i_0;$$

$$i_b = \frac{\dot{U}}{2Z_1} \text{ (не зависит от } Z_k\text{);}$$

$$i_c = \dot{U} \frac{Z_0 + 8Z_1 + 3Z_k}{2Z_1(Z_0 + 2Z_1 + 3Z_k)};$$

$$\dot{U}_a = \dot{U} \frac{Z_0 + 2Z_1}{Z_0 + 2Z_1 + 3Z_k};$$

$$\dot{U}_b = \frac{3}{2} \dot{U} \frac{Z_0 + Z_k}{Z_0 + 2Z_1 + 3Z_k};$$

$$\dot{U}_c = \dot{U} \frac{Z_0 - 4Z_1 - 3Z_k}{2(Z_0 + 2Z_1 + 3Z_k)};$$

$$\dot{U}_k = \dot{U} \frac{3Z_k}{Z_0 + 2Z_1 + 3Z_k} = i_a Z_k.$$

Необходимо отметить, что фазные напряжения при пуске двигателя в ход будут, как это видно из уравнений, определяться не только сопротивлениями фаз двигателя, но и сопротивлением конденсатора.

В общем случае величина перенапряжений тем выше, чем ближе соотношение сопротивлений двигателя и конденсатора будет удовлетворять условию резонанса напряжений. Диапазон опасных перенапряжений при пуске при любых  $Z_k$  может быть найден для любого двигателя. При этом пусковая емкость конденсаторов может быть рассчитана так, чтобы возможность больших перенапряжений в двигателе была исключена. Обычные оптимальные пусковые и рабочие емкости, как показали опыты, не сопряжены с большими перенапряжениями в двигателе в установившемся режиме. Вопрос же о перенапряжениях в неустановившемся пусковом режиме для этой схемы пока открыт и требует дополнительных исследований.

Напряжение в конденсаторной фазе двигателя, наиболее подверженной возможности перенапряжений при пуске, при  $Z_k = 0$  ( $C = \infty$ ):  $\dot{U}_a = \dot{U}$  — напряжению сети.

Зная  $I_1$  и  $I_2$  или  $U_1$  и  $U_2$ , можно определить моменты систем прямой и обратной последовательности. Моменты  $M_1$  и  $M_2$  могут быть взяты непосредственно из круговой диаграммы трехфазного двигателя с соответственным пересечением.

тому пропорционально квадрату отношений напряжений и токов, иначе говоря,

$$M_1 = M_{1N} \left( \frac{U_1}{U_{1N}} \right)^2 = M_{1N} \left( \frac{I_1}{I_{1N}} \right)^2;$$

в этом случае  $M_{1N} = M_{2N}$ ;

$$M_2 = M_2 \left( \frac{U_2}{U_{2N}} \right)^2 = M_{2N} \left( \frac{I_2}{I_{2N}} \right)^2.$$

Результирующий момент двигателя

$$M = M_1 - M_2.$$

Удобство такого способа определения моментов очевидно. Наивыгоднейшие пуск и работа двигателя, очевидно, будут тогда, когда симметричные составляющие токов и напряжений обратной последовательности равны 0, т. е. когда

$$2\sqrt{3}Z_1 = j(Z_0 + 2Z_1 + Z_k).$$

Отсюда величина необходимого для этого случая сопротивления конденсатора

$$Z_k = \frac{4}{3} Z_1 e^{j(240 + \varphi_1)} - \frac{1}{3} Z_0 e^{j\varphi_0}.$$

Это равенство возможно только тогда, когда вещественная часть комплекса правой части уравнения равна 0:

$$4z_1 \cos(240 + \varphi_1) - z_0 \cos \varphi_0 = 0,$$

а мнимая часть этого же комплекса равна сопротивлению конденсатора:

$$Z_k = j \frac{4}{3} z_1 \sin(240 + \varphi_1) - j \frac{1}{3} z_0 \sin \varphi_0,$$

где  $z_1$  и  $z_0$  — модули комплексов.

Это позволяет сделать следующее заключение: чтобы обеспечить в общем случае при каждом  $s$  и  $Z_1$  отсутствие токов и напряжений обратной последовательности, необходимо дополнительно к емкостному сопротивлению включать с ним последовательно активное сопротивление  $R$ . Но так как при пуске в ход и при разных нагрузках двигателя  $s$  и  $Z_1$  различны, — для обеспечения вышеуказанного условия требуется изменять соответственно  $Z_k$  и  $R$  так, чтобы они удовлетворяли уравнению.

Конденсаторы переменной и регулируемой емкости в технике сильных токов не нашли применения, поэтому от плавного изменения емкости следует отказаться, а прибегать к ступенчатому путем включения или отключения отдельных конденсаторов батареи. Практическое использование двигателя при указанном наивыгоднейшем режиме будет не всегда возможно; так, это сопряжено с появлением в двигателе слишком неравномерных и больших токов, недопустимых для его нормальной работы.

При определении оптимальных рабочих емкостей конденсатора нужно ограничить величины токов так, чтобы они во всех фазах двигателя не превосходили номинальной величины в трехфазном режиме.

$$I_a = I_b = I_N.$$

Подставляя в эти равенства токи  $I_a$ ,  $I_b$  и  $I_N$ , указанные выше, после ряда упрощений будем иметь, с одной стороны

$$2\sqrt{3}(Z_1 e^{-j30^\circ} + Z_2 e^{j30^\circ}) = 2(Z_1 e^{j60^\circ} + Z_2 e^{-j60^\circ}) + Z_0 + 3Z_k;$$

с другой

$$\frac{I}{6Z_1} = \frac{Z_1 e^{-j30^\circ} + Z_2 e^{j30^\circ}}{Z_1(Z_0 + 4Z_2 + 3Z_k) + Z_2(Z_0 + 3Z_k)}.$$

При постоянстве  $Z_0$  и  $Z_2$ ,  $Z_1$  и  $Z_k$  можно подобрать такими, чтобы они удовлетворяли этим уравнениям.

При этом, как видно из условия, требуется соблюсти лишь равенство модулей комплексов правой и левой части этих уравнений, независимо от различия их вещественных и мнимых компонент.

Пример. Для двигателя «Вольта» — 30 л. с.: 215 V; 80 A;

965 об/мин; 50 Hz;  $Z_0 \approx 0,47 e^{j81,5^\circ}$ ;  $Z_2 \approx 0,3 e^{j76^\circ}$ ;

при  $I_a = I_b = I_N = 80$  A

и  $Z_1 \approx 1,65 e^{j37^\circ}$

$s \approx 0,8 s_N$ ;  $Z_k = 3,17 \Omega$ .

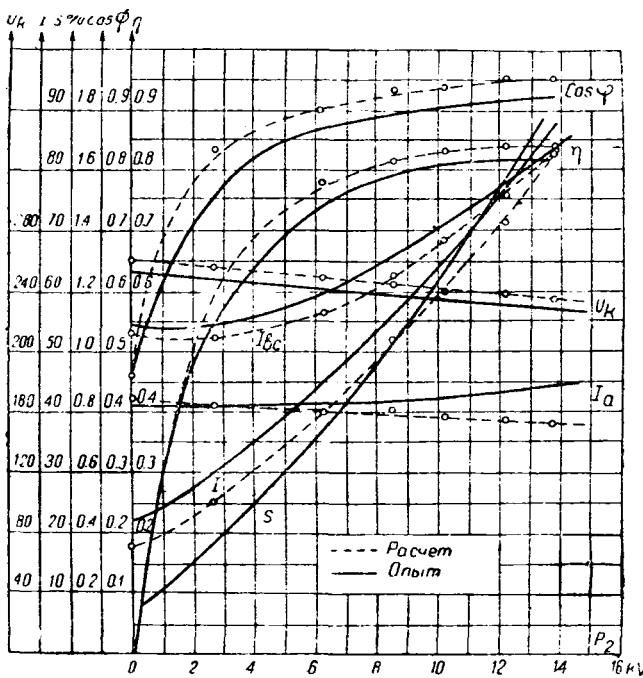


Рис. 4. Рабочие характеристики двигателя «Вольта» при  $z_k = 6,2 \Omega$  и  $C = 515 \mu F$

Необходимая для этого емкость конденсаторов  $C = 1020 \mu F$ ; если ее, как это было в опыте, включить через трансформатор с коэффициентом трансформации  $K = 12,1$ , то

$$C' \approx \frac{C}{K^2} \approx \frac{1020}{12,1^2} \approx 6,87 \approx 7 \mu F.$$

При этих условиях

$$P_2 \approx 16,6 \text{ kW} \approx 0,755 P_{2N}; P_1 \approx 18,75 \text{ kW};$$

$$\eta \approx 0,885 \approx \eta_N; \cos \varphi \approx 0,98 \text{ (упреждающий)};$$

$$U_a \approx 115 \text{ V}; U_k \approx 1,18 U_N \approx 254 \text{ V}.$$

Пусковой момент при этой емкости  $M \approx 0,6 M_N$ , где индекс  $N$  соответствует нормальному режиму двигателя при питании его трехфазным током.

При определении величины необходимой оптимальной емкости конденсаторов для пуска двигателя, очевидно, следует исходить из допустимой кратности пускового тока к номинальному и из величины необходимого для установки пускового момента.

Оптимальные, практически наивыгоднейшие емкости конденсаторов при пуске и работе двигателя не совпадают друг с другом.

Исходя из условий работы двигателя, можно найти величину пусковой и рабочей емкости конденсаторов отдельно.

Там, где требования к пусковому моменту невелики, можно ограничиться выбором величины такой рабочей емкости конденсаторов, которая бы обеспечила и хорошие рабочие

характеристики двигателя и необходимый пусковой момент.

На рис. 4 сопоставлены расчетные характеристики с опытными для вышеуказанного двигателя. За неимением конденсаторов большой емкости в рабочей схеме был взят конденсатор с емкостью  $C \approx 3,5 \mu F$  и включен через две фазы трехфазного трансформатора  $Ck = \frac{1500}{124} \approx 12,1$ .

Действующая емкость при этом

$$C' \approx Ck^2 \approx 3,5 \cdot 12,1^2 \approx 515 \mu F.$$

Введение трансформатора в конденсаторный контур сильно отразилось на опытных характеристиках. Дополнительная проверка всего вышеизложенного на двигателе меньшей мощности с подключением к нему конденсаторов без трансформатора приводит почти к полному совпадению расчетных характеристик двигателя с опытными, что подтверждает верность теоретических суждений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. E. Arnold, Die Wechselstromtechnik. Bd. V. I, S. 275.
2. I. Biermanns, Ueber einen Einphasen-Induktionsmotor. Arch. Elektrot., 1926, S. 519.
3. F. Punga, Graphische Behandlung des Einphasen-Induktionsmotors mit Kapazität und Hilfsphase. Arch. Elektrot., 1927, S. 267.
4. F. Punga, Das Kreisdiagramm des Einphasen-Induktionsmotors, ETZ, 1928, S. 603.
5. B. E. Balle, The Condenser Motor. AIEE, 1929, p. 596.
6. B. E. Balle, Single-Phase Condenser Motor. El. W., 1928, p. 597 and 647.
7. H. C. Sprecht, The Fundamental Theory of the Capacitor Motor. AIEE, 1929, p. 607.
8. W. I. Morigi, The Revolving Field Theory of the Capacitor Motor. AIEE, 1929, p. 614.
9. H. C. Sprecht, Performance of Capacitor Motor Established by Test. Electr. W., 1929, p. 532.
10. H. Wolf, Der Einphasen-Induktionsmotor mit Kondensatoren in der Hilfsphase. Arch. Elektrot., 1930, S. 459.
11. F. Kacser, Das Anzugsmoment und die Streuung von Einphasenmotoren mit Hilfsphase. E и M, 1931, S. 593.
12. B. F. Balle, Selbstanlauf von Einphasen-Induktionsmotoren, Z. VDI, 1931, S. 1053.
13. W. Thoma, Ueber das Anlaufmoment des asynchronen Einphasenmotors mit Hilfsphase. Arch. Electrot., 1932, S. 856 auch E и M, 1933, S. 281.
14. F. Punga, Das Stromvektordiagramm des Einphasenmotors mit Kapazitäts in der Hilfsphase. ETZ, 1933, S. 304 und 347.
15. M. Kiondl, Berechnung von Einphasen-Kondensator-Motoren. E и M, 1934, S. 133 auch Bulletin Schweizerischer Elektrotechn., 1934, S. 143.
16. A. Schanz, Momentbildung und Läuferkupplung Einphasen-Kondensatormotor, E и M, 1934, S. 333.
17. Fr. Bauer, Der Kondensator in der Stark-stromtechnik. Berlin 1934, S. 119.
18. W. Schuiski, Das Anlaufmoment des Einphasen-motors mit Hilfsphase. ETZ, 1935, S. 1275 und Arch. Electrot., 1935, S. 210.
19. И. М. Эдельман, Однофазный электродвигатель с конденсатором в вспомогательной фазе. «Электричество», № 3, 1936, стр. 14.
20. Г. Б. Меркин и В. И. Коновалов, О конденсаторных моторах. «Труды ЛИИ», № 1, 1936.

## Электрификация Японии (1934—1936 гг.)

В. И. Михайлов

Энергетический институт Академии наук СССР

**ФОРСИРОВАННАЯ** подготовка Японией «большой войны» естественно должна была особенно отразиться на развитии электроэнергетики страны. Об этом свидетельствуют как мероприятия по реорганизации электрохозяйства, применительно к нуждам войны, так и сдвиги в политике электростроительства и темпы роста электробаланса в результате резкого увеличения спроса на электроэнергию со стороны военной промышленности, в частности для электроемких производств.

В общем комплексе организационных мероприятий военного характера весьма показателен подготовившийся в 1936 г. проект полного государственного контроля над электрохозяйством.

Изданым в 1932 г. законом правительству были предоставлены довольно широкие права по регулированию электроснабжения (право отмены существующих тарифов, право принудительного отчуждения электропредприятий, контроля над электростроительством) [1, 16]. Разработанным в прошлом году проектом намечалась дальнейшая милитаризация электрохозяйства. Официальных сообщений об этом проекте не было опубликовано, но комментарии к нему в иностранной прессе обрисовывают его общие контуры.

В основу проекта было положено создание акционерной компании с капиталом в 2 млрд. иен, управляемой правительственные органами. Предполагалось, что существующие электротоварищества должны будут передать этому обществу принадлежащее им имущество (передача подлежат все электростанции мощностью от 2 MW и линии электропередачи напряжением от 30 kV и выше). Взамен этого предприятия получают акции, по которым правительство гарантирует определенный дивиденд. Иностранные займы должны быть конвертированы. Общество приобретает право выпуска новых займов на сумму 6 млрд. иен. Новое электростроительство должно будет производиться за счет государственных кредитов. Тарифы на электроэнергию будут устанавливаться на конференции представителей различных министерств [2, 26].

Весьма характерны приводимые в японском журнале *Oriental Economist* [3] мнения противников проекта. Последние считают, что принятие этого закона будет означать формальное установление фактической фашизации электрохозяйства, как одного из важных элементов общей фашизации страны.

Основной базой электрификации Японии, как известно, служит гидроэнергия; тепловые станции играют роль преимущественно резервных и пиковых станций.

По новым данным мировой энергетической конференции [4] потенциальные гидроэнергетические ресурсы собственно Японии составляют (при к. п. д. 100%) — 5,67 тыс. MW по минимальному и 21,63 тыс. MW по среднегодовому расходу воды. Среднегодовая мощность использованных гидроэнергетических участков (установки мощностью от 1 MW и выше) определяется величиной 8,48 тыс. MW. Несомненно, что «сливки» с запасов «белого угля» уже сняты — энергетические участки, наиболее выгодные с географической и экономической точек зрения, использованы. Однако неиспользованная гидроэнергия составляет больше половины всего потенциального фонда гидроэнергетических ресурсов.

С другой стороны, угольные ресурсы страны сравнительно ограничены. По подсчетам, опубликованным мировой энергетической конференцией [4], хотя и сильно увеличенным против прежних оценок, в собственно Японии насчитывается потенциальных запасов антрацита и каменного угля лишь 16 218 млн. t и бурого угля 473 млн. t.

Угольная промышленность собственно Японии удовлетворяет примерно 90% современной потребности страны в угле, остальная часть потребности покрывается ввозом главным образом из Манчжурии, Китая, французского Индокитая.

Потребление угля в электрохозяйстве составляло в 1934 г. 2,56 млн. t угля (около 7% общего потребления) и в 1935 г. — около 3 млн. t (около 7,8%) [9]. Дальнейшее развитие тепловых электростанций, очевидно, ухудшит угольный баланс страны.

В том же направлении действуют и такие факторы, как рост военной металлургии, углехимии и стремления к энергетической автаркии в части жидкого горючего, идущие по линии переработки угля<sup>2</sup>.

Динамику установленной мощности электростанций общего пользования иллюстрирует табл. 1<sup>3</sup> [4, 6, 7, 10].

В 1928 г. японское электрохозяйство располагало 22 станциями мощностью от 30 MW и выше

<sup>2</sup> Наряду с получением нефти из фукусинских сланцев (в Манчжурии) Япония стремится развернуть производство жидкого горючего из углей путем низкотемпературного коксования и других методов. Несколько таких установок уже работают. В этой области Япония опирается на прямую помощь фашистской Германии, поставляющей необходимое оборудование и патенты.

<sup>3</sup> Следует отметить несоответствие между динамикой мощности всех станций и станций общего пользования. Это обстоятельство выявляется особенно резко в 1932 г., когда мощность всех станций возросла на 276 MW, а мощность станций общего пользования — на 822 MW. Повидимому, объясняется это тем, что некоторые электростанции, относившиеся ранее к группе фабрично-заводских станций, в последующем были включены в централизованный сектор электроснабжения.

Таблица 1  
Установленная мощность электростанций

Годы	Все электростанции			В том числе	
	гидростанции		тепловые станции		станций общего пользования
	MW	% к сумме	MW	% к сумме	MW
1928	2290	59,5	1532	40,5	3822
1929	2582	61,6	1612	38,4	4194
1930	2797	63,6	1602	36,4	4399
1931	3057	65,6	1600	34,4	4657
1932	3106	63,0	1827	37,0	4933
1933	3169	62,3	1912	37,7	5081
1934	3244	61,0	2070	39,0	5314
					4740

(12 гидравлических и 10 тепловых станций) [12]. В 1933 г. общее число станций таких мощностей достигло 34 (17 гидравлических и 17 тепловых). Распределение этих станций по группам демонстрирует сводка [6] (табл. 2).

Таблица 3  
Выработка электроэнергии

Годы	Всего тыс. MWh	В том числе			
		гидростанции		тепловые станции	
		тыс. MWh	% к сумме	тыс. MWh	% к сумме
1929 . . . .	13 312	11 562	86,9	1750	13,1
1930 . . . .	13 910	12 473	89,7	1437	10,3
1931 . . . .	14 402	13 118	91,1	1284	8,9
1932 . . . .	15 950	14 336	90,0	1614	10,0
1933 . . . .	18 160	15 713	86,5	2447	13,5
1934 . . . .	19 908	16 390	82,4	3518	17,6
1935 * . . . .	21 400	17 200	80,5	4200	19,5

\* Оценка по материалам III Мировой энергетической конференции.

Характерно, что начиная с 1932 г., на тепловых станциях вводится более крупная мощность, чем на гидростанциях (рис. 1); в результате этого удельный вес последних в суммарной мощности, возраставший в течение ряда предшествующих лет, начинает падать.

Имеющиеся пока неполные сведения свидетельствуют о том, что ввод тепловых мощностей доминировал и в 1935 г.

Согласно опубликованным материалам в 1935 г. было пущено 27 новых тепловых электростанций. Самая крупная из них в Amagasaki, принадлежащая обществу Kwansai United Thermal Company, имеет мощность 212 MW. В том же году закончена постройка 11 гидростанций, большей частью мощностью менее 10 MW [11].

Форсированное строительство тепловых электростанций, противоречащее стремлению Японии к энергетической автаркии, обусловливается не столько потребностью в тепловом резерве для гидростанций, сколько расчетами на близкую войну и в связи с этим — необходимостью ввода в кратчайший срок новых станций для нужд военной промышленности наряду со стремлением децентрализовать электроснабжение важнейших

промышленных районов в целях большей надежности электроснабжения во время военных действий.

Общая мощность электростанций, находившихся в постройке в 1935 г., составляла около 2000 MW. Наиболее крупной из числа сооружаемых тепловых станций является станция в Tsurumi близ Иокогамы мощностью 178 MW.

Крупнейшая из строящихся гидростанций — Senju, на р. Shinano, в 200 км от Токио и в 30 км от Японского моря, будет иметь мощность 157 MVA (5×31; 2×1) [9]. Постройка этой станции, предназначенной для обслуживания железных дорог<sup>4</sup> начата в 1931 г. Пуск первой очереди предполагается в 1938 г., а окончание постройки — в 1941 г. Предполагаемый ввод новых мощностей (на новых станциях и расширение действующих станций) составит в 1937 г. — 262 MW, в 1938 г. — 285 MW и в 1939 г. — 200 MW [27].

Динамика выработки электроэнергии на станциях общего пользования<sup>5</sup> (табл. 3) подчеркивает отмеченные выше сдвиги в сторону тепловой энергии [8, 10].

Таблица 2

Мощность станций MW	Гидростанции		Тепловые станции	
	число	общая мощность MW	число	общая мощность MW
30—39	8	267	6	195
40—49	6	262	5	204
50—59	2	106	3	152
60—69	—	—	2	124
70—79	1	72	—	—
100—150	—	—	1	140
Всего	17	707	17	815

Удельный вес тепловых электростанций в электробалансе повысился от 8,9% в 1931 г. до 19,5% в 1935 г.

Подавляющая часть электроэнергии — около 81% — производится на электростанциях, расположенных на главном японском острове — Хондо, около 13% — на о. Киуси, 4% на о. Хоккайдо и 2% — на о. Сикоку<sup>6</sup>.

В 1936 г., как показывает динамика месячных индексов (рис. 2), выработка электроэнергии продолжала расти, однако при более глубоком сезонном провале на кривой в начале года [13].

<sup>4</sup> До настоящего времени государственные электрифицированные железные дороги обслуживались двумя тепловыми станциями: Akabane 18 MW, пущенной в 1923 г., и Kawasaki — 80 MW, введенной в эксплуатацию в 1930 г.

<sup>5</sup> Выработка промышленных станций по данным Международного союза электроснабжающих предприятий (UIPD) составила в 1933 г. — 1,32 млн. MWh, в 1934 г. — 2,09 млн. MWh.

<sup>6</sup> Данные за 1934 г.

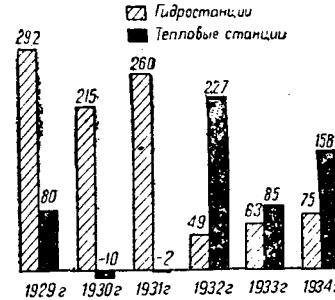


Рис. 1. Ввод мощностей на тепловых и гидравлических станциях Японии в MW

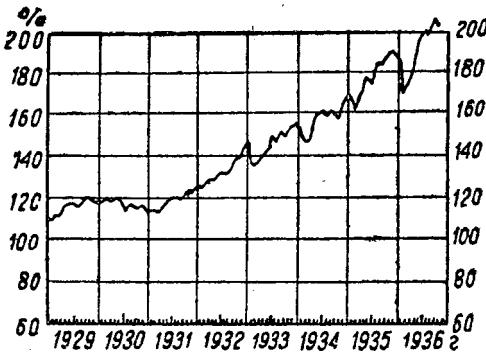


Рис. 2. Индекс выработки электроэнергии (1928 г.=100)

Состав и протяженность высоковольтной сети характеризуют следующие данные<sup>7</sup> (табл. 4) [14].

Таблица 4

Протяженность и состав высоковольтных сетей (от 30 кВ и выше)

Напряжение в кВ (на конце линии)	Протяженность в км	
	по трассе	по цепям
30	7 144	8 284
40	1 773	2 052
50	1 457	2 106
60	5 762	9 484
70	2 338	4 228
100	416	832
140	2 687	5 374
Всего . . .	21 577	32 360

Наиболее крупными центрами потребления электроэнергии являются: Токио, Иокогама, Нагоя, Киото, Осака, Кобе.

Бытовое потребление электроэнергии занимает в расходной части электробаланса второстепенное место. По оценкам, электроэнергией пользуются около 90% всех домашних хозяйств (1932 г.). Однако применение электричества в быту ограничивается весьма скучным освещением<sup>8</sup>. Одна треть всех присоединенных к сети ламп сосредоточена в 6 больших городах. В сельских местностях у подавляющего числа абонентов имеется лишь по одной лампе на все жилище [15].

О потреблении электроэнергии для электрической тяги мы располагаем данными лишь в отношении государственных железных дорог, протяженность которых в 1935 г. составляла 582 км (в том числе в зоне Токио — 422 км, в зоне Осака — 107 км и в горных районах — 53 км). На этих линиях было потреблено электроэнергии в 1929 г.—237 тыс. MWh, в 1934 г.—373 тыс. MWh и в 1935 г.—420 тыс. MWh.

Общее потребление электроэнергии для тяги составляет, повидимому, относительно значительную величину, так как в Японии имеется развитая

сеть местных электрифицированных железных дорог, принадлежащих частным компаниям. Протяженность этих линий, включая трамваи, составляла в конце 1934 г. 5842 км.

Основным потребителем электроэнергии является промышленность и особенно отрасли военного значения, форсированное развитие которых является основным фактором, обусловливающим рост электробаланса в последние годы.

Темпы роста, структуру и сдвиги в потреблении электроэнергии в промышленности характеризуют приводимые ниже данные (табл. 5 и 6) [17].

Таблица 5

Характеристика темпов роста потребления электроэнергии в промышленности

Годы	тыс. MWh	% к пред. году
1929	5060	109
1930	5447	108
1931	5439	100
1932	6348	116
1933	7506	118
1934	9265	123

Таблица 6

Характеристика структуры и сдвигов в потреблении электроэнергии в промышленности

Отрасли промышленности	1926	1932		1934	
	тыс. MWh	тыс. MWh	% к 1926 г.	тыс. MWh	% к 1926 г.
Всего . . .	3681	6348	173	9265	251
В том числе:					
Химическая . . . . .	1298	2897	223	4016	310
Горная . . . . .	743	976	132	—	—
Металлопромышленность . . .	262	519	198	—	—
Машиностроительная . . . .	113	153	135	—	—
Силикатная, керамич., цементная . . . . .	334	460	138	—	—
Текстильная . . . . .	834	1103	132	—	—
Пищевая . . . . .	40	60	150	—	—
Прочие . . . . .	57	180	315	—	—

В период 1926—1934 гг. потребление электроэнергии в электрохимических производствах увеличилось в 3 раза, а удельный вес этих отраслей в суммарном потреблении промышленности возрос от 35 до 43,5%.

За последние годы (1935—1936 гг.) расход электроэнергии на нужды электрохимии и электрометаллургии еще более вырос, в результате расширения уже существовавших и вступления в работу новых заводов.

Продукцию основных отраслей электрохимии и электрометаллургии (1934 г.) иллюстрирует табл. 7 [18].

<sup>7</sup> Данные относятся к 1931 г.

<sup>8</sup> Средняя мощность ламп меньше 20 W.

По другим источникам [28] потребление промышленности оценивается более высокими цифрами (в 1931 г.—6 314 000 MWh, в 1932 г.—7 154 000 MWh, без учета горной промышленности и мелких предприятий обрабатывающей промышленности, а также сельского хозяйства и строительства).

Таблица 7

Наименование промыслов	Годовое производство тыс. т
Сульфат аммония . . . . .	1000
Карбид кальция . . . . .	250
Электролит. каустич. сода . .	80
Электросталь . . . . .	170
Ферросплавы . . . . .	40
Электролит. медь . . . . .	70
Цинк . . . . .	6

Таблица 8

Производства	Мощность установок MVA
Электролиз воды . . . . .	220
Карбид кальция . . . . .	320
Электролиз хлористого натрия . . . . .	40
Электросталь . . . . .	200
Ферросплавы . . . . .	100
Рафинирование металлов . . . . .	20

Таблица 9

Производство электростали	Годы	тыс. т
1930 . . . . .	62,1	
1932 . . . . .	69,7	
1933 . . . . .	137,6	
1934 . . . . .	Около 170,0	

Общая мощность установок в основных производствах электрохимии и электрометаллургии (1934 г.) превышает 900 тыс. kVA<sup>10</sup> (табл. 8).

Весьма показателен рост выплавки электростали в последние годы в результате установки новых электропечей в ряде предприятий (табл. 9).

Потребность страны в алюминии вплоть до последних лет покрывалась импортом из других стран. В период 1934—1936 гг. в Японии было扑щено в работу несколько алюминиевых заводов.

В настоящее время производством алюминия заняты 3 основных компании [13]:

1. Компания Japan Electric Industry, которая закончила в 1936 г. расширение своих установок, доведя производство до 7300 т в год.

2. Компания Manchou Aluminium (Nichi-man), начавшая производство с 1936 г.

3. Компания Japan Aluminium, пустившая в работу пока лишь часть оборудования. Полностью установка будет пущена в 1937 г. с годовой выработкой в 6 тыс. т<sup>11</sup>.

Разворзывание отраслей военной промышленности обусловливает развитие электроэнергетической базы не только в самой Японии, но и в колониях.

По сообщениям иностранной печати [27] в Северной Корее введена в эксплуатацию новая гидростанция мощностью 15 MW, принадлежащая Choshinko Hydroelectric Company. Общая мощность станций этой электрокомпании составляет 108 MW. Половина этой мощности обслуживает химическую промышленность.

Для нужд различных отраслей промышленности, имеющих военное значение (алюминий, сталь, ферросплавы, древесная масса и др.), производится гидроэлектростроительство также на о. Формоза.

Гидроэнергетические ресурсы этого острова составляют 1,1 тыс. MW при естественном водотоке и около 2 тыс. MW, учитывая возможности регулирования.

В 1934 г. на о. Формоза пущена в работу гидростанция Jitsugetsutan № 1 мощностью 100 MW, которая будет снабжать электроэнергией алюминиевый завод и другие отрасли промышленности.

<sup>10</sup> Некоторые производства работают не круглый год, при невысоком годовом использовании установок.

<sup>11</sup> Кроме того, алюминий производят и другие компании: Yahagi Industrial Co, Chosen Nitrogen Manufacturing Co, Sumitomo Concern, South Manch. Rail.-Way Co, Taiwan Electric Co) [20].

Строится гидростанция Jitsugetsutan № 2 43,5 MW, пуск которой предполагается в 1937 г. Несколько станций находится в стадии проектирования. Общая установленная мощность электростанций на острове в 1934 г. составила 150 MW, а выработка — 275 000 MWh.

Япония всячески форсирует также милитаризацию электрохозяйства Манчжурии для нужд войны<sup>12</sup>.

Анализ показывает, что развитие японского электрохозяйства за последние годы полностью связано с лихорадочной подготовкой Японии к «большой» войне. Вместе с тем анализ демонстрирует внутренние противоречия энергетической политики Японии, лежащие в частности в непреодолимых трудностях создания энергетической автаркии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Electrical Review, 1935, 21/VI.
2. Мировое хозяйство и мировая политика, 1936 декабрь.
3. Oriental Economist, 1936 октябрь.
4. Statistical Yearbook of the World Power Conference, № 1, 1936.
5. Dunlop, Power Resources of the World, 1929.
6. Japan Manchoukuo Yearbook, 1935.
7. Japan Yearbook, 1935.
8. Statistique annuelle de la Société des Nations, 1935—1936.
9. Материалы III Мировой энергетической конференции, 1936.
10. ETZ, № 47, 1936.
11. Electrical Times, 1936, 26/XI.
12. World Power, 1929 июнь.
13. Oriental Economist, 1936 декабрь.
14. Motoji Shibusawa, Normalization des tensions pour les réseaux de transport et de distribution en Japan. Conférence internationale de grands réseaux électriques. Paris, session de 1933, t. III.
15. Edison Electric Institute Bulletin, 1935 ноябрь.
16. G. B. Sansom and H. A. Macrae, Economic conditions in Japan, 1935.
17. Elektrizitätsverwertung № 4, 1935.
18. Electrical Engineering, 1936 март.
19. Журнал химической промышленности, № 23, 1936.
20. The Far Eastern Review, 1937 февраль.
21. ETZ № 3, 1934.
22. Electrical Review, 1936, 12/VI.
23. Technik und Wirtschaft, 1935 октябрь.
24. Electrical Review, 1936, 17/IV.
25. Electrical Review, 1936, 19/VI.
26. L'industrie électrique, 1936, 25/IX.
27. Elektrizitätswirtschaft № 10, 1937.
28. Fuel and Power in Japan, 1935.

<sup>12</sup> См. фактические данные в докладе T. Tsukuda, Electric power projects for future supply in Manchoukuo в материалах III Мировой энергетической конференции 1936 г.

## О русской электротехнической терминологии

Термины «сменный ток» и «прямой ток», которыми инж. Бобровский<sup>1</sup> предлагает заменить термины «переменный ток» и «постоянный ток», по нашему мнению, не могут быть приняты.

Эти термины являются, во-первых, ненужными, во-вторых, менее удобными и точными, нежели общепринятые и общеупотребительные термины. Если же принять во внимание огромную организационную (издательскую, педагогическую и пр.) работу, которой потребует замена основных терминов электротехники, — легко понять, сколь не продумана вышеуказанная терминология инж. Бобровского.

Другие «логичные» и «лаконичные» термины, предложенные инж. Бобровским, например, «смен-перенаправ» или «прямперенаправ» являются сокращениями буквальных переводов соответствующих немецких слов. Так как немецкое словообразование совершенно отлично от русского, то и терминология инж. Бобровского получилась «онемеченной» и русскому языку чуждой и не свойственной.

Инж. Калина<sup>2</sup> в своей статье предлагает в противоположность общепринятым толкованию называть геометрическую разность напряжений — потерей напряжения, а алгебраическую разность напряжений — падением напряжения. При таком толковании по мнению инж. Калина будет установлено смысловое соответствие между потерей напряжения и обусловленной ею потерей мощности. Предложение инж. Калина основано на следующих недоразумениях:

1. Инж. Калина пишет: «Действительно, под словом «потеря» в физике вообще понимается некоторая часть энергии, теряющаяся...» Такое толкование слова «потеря» является произвольным и незаконным.

<sup>1</sup> «Электричество» № 24, 1936.

<sup>2</sup> Там же № 24, 1936.

Слово «потеря» имеет более общий смысл и в физике, например, говорят о «потере» скорости, давления, силы, заряда и т. п., а также и о потере энергии.

2. Требование смыслового соответствия между «потерей энергии» и «потерей напряжения» незаконно. Как «потери» скорости давления и т. д. не обусловливают и не всегда сопровождаются потерями энергии, так и «падение» или «потеря» напряжения не всегда влечет за собою потери энергии (например идеальный конденсатор или катушка самоиндукции без активного сопротивления могут вызывать очень большие «потери» напряжения и в то же время не требуют никаких потерь энергии).

На основании сказанного заключаем, что предложение инж. Калина является также необоснованным и должно быть отвергнуто.

Разбор предложений инж. Бобровского и инж. Калина показывает, что эти предложения могут служить примером некритического и недостаточно вдумчивого отношения к вопросам научной терминологии.

Необходимо увязать задачи обсуждения электрической терминологии с вопросом о чистоте русского языка. Ведь «прямперенаправы» инж. Бобровского могут быть поставлены в один ряд с «мокроступами» известного руссификатора графа Шишкова и подтверждают необходимость и своевременность такой увязки. Борьба за чистоту русского языка проводится сейчас на научных конференциях, в учебных заведениях, на страницах нашей печати. В этой борьбе принимают участие широкие круги советской общественности. Мимо этой борьбы не может и не должна пройти дискуссия о русской электротехнической терминологии.

А. П. Новиков

## БИБЛИОГРАФИЯ

Б. П. АПАРОВ, проф. Московско энергетического института им. В. М. Молотова. **МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.** Том I—Асинхронные машины. Утвержден ГУУЗ НКТП в качестве учебного руководства для энергетических вузов. Издание ОНТИ, 1936 г.

Рецензируемая книга представляет, как указано автором в предисловии, первый том предложенного к печатанию труда «Машины переменного тока» и посвящена теории асинхронных машин.

Основная особенность книги по сравнению с существующими учебниками заключается, как указано в предисловии, в изложении, кроме рабочего процесса, также детальной теории особых режимов. При изложении этих специальных глав простота изложения по признанию автора «должна быть в отдельных случаях уступить научности изложения», что автор позволил себе, надеясь, на рост и запросы советского читателя, требующего не только книг для первоначального

ознакомления с электрическими машинами, но и глубокого научного изучения их рабочего процесса».

Давно назрела нужда в книге, отвечающей по своему содержанию изложенной выше программе.

Имеющиеся в настоящее время учебники обычно не идут дальше элементарного рабочего процесса и расчета основных характеристик. Специальным вопросам, например, влиянию высших гармоник, добавочным потерям, переходным явлениям и т. п., посвящено большое количество работ в иностранной и отчасти нашей периодической литературе. Широкому кругу читателей эти материалы большей частью недоступны.

Поэтому следует приветствовать попытку проф. Б. П. Апарова составить современное учебное руководство.

Задача эта нелегкая. Существуют различные представления о том, как должно быть построено современное руководство по электрическим машинам. Наиболее целесообразным является, повидимому, изложение общей для всех машин основной теории на базе „идеальной“ машины (т. е. машины, в которой не учитывается насыщение, пренебрегается зубчатостью статора и ротора, принимается синусоидально распределенная обмотка и т. п.). При этом на первый план выдвигается физическая сторона рабочего процесса, вырабатывается единство метода, чрезвычайно полезное при дальнейшем изучении отдельных видов машин.

В разделах, посвященных последним, достаточно рассмотреть лишь вопросы, являющиеся специфическими для данного вида, вопросы, обусловленные фактическим отклонением машины от „идеальной“ ее конструктивными особенностями.

Единство методов анализа и расчетов исключительно важно и для самостоятельной работы. Хорошее учебное руководство, предназначенное для специализирующихся в области электрических машин, должно и начинаящего с самого начала поставить на этот правильный путь.

Возможна и такая структура учебного руководства, когда основная теория каждого вида машин излагается вне связи с другими.

По этому принципу и составлена книга Б. П. Апарова. Значительная ее часть посвящена теории обмоток, рассеянию и рабочему процессу „идеальной“ асинхронной машины. Специфическим вопросам — влиянию зубчатости на характеристику вращающего момента и потери, влиянию насыщения и т. п. — посвящена меньшая часть. Другие вопросы, рассмотренные в книге, как, например, неустановившийся режим, вопросы перенапряжения, не являются специфическими для асинхронной машины.

Следует отметить большую неровность изложения. В то время как менее сложные вопросы основной теории, в особенности первые главы книги, излагаются пространно и, пожалуй, несколько растянуты, более сложные специальные вопросы изложены схематично, лаконично, явно в ущерб ясности.

В книге имеются существенные ошибки, и в ряде случаев изложение далеко от того, что принято называть научным.

Приведем несколько примеров подтверждающих сказанное. В конце второй главы на стр. 49 (и в дальнейшем повторяется неоднократно) читаем: „обмотка в виде беличьей клетки является многофазной обмоткой с числом фаз  $m_2 =$

$= \frac{Z_2}{p}$ , где  $Z_2$  — число стержней ротора;  $p$  — число пар по-

люсов. Как же быть в том случае, когда  $\frac{Z_2}{p}$  не является целым числом? Например, в 6-полюсной машине с 50 стержнями на роторе? Число фаз может быть только целым. Можно представить себе двух- или трехфазную систему, но не  $2\frac{1}{2}$ -фазную.

Очевидно, общее определение, даваемое автором, — неправильно. На стр. 52 автор говорит о числе ампервитков  $F_x$ , необходимых для создания потока или индукции в любой точке воздушного зазора ( $x$  — длина дуги по периферии ротора — одна из координат рассматриваемой точки). С каких пор поток является понятием точечным? На стр. 66 говорится о геометрическом суммировании синусоид намагничивающих сил (подчеркнуто мной — И. Б.). В пятой главе, весьма важной для теории асинхронных машин, на стр. 87 и 88 дано определение рассеяния. Автор складывает так называемый „общий поток“ с потоком рассеяния в то время, как для рассматриваемых им многовитковых катушек (вернее катушек, поперечным сечением которых пренебречь нельзя) такая сумма не имеет смысла.

Суммировать можно только „потокосцепления“ или соответствующие им напряжения.

Определение так называемого „рассеяния двойного сцепления“ (§ 32) имеет смысл в том случае, когда может быть определено распределение „общего потока“. Поэтому данное на рис. 71 и в относящемся к нему тексте истолкование двойного рассеяния, не связанное с соотношением токов в обеих обмотках, не разъясняет сущности двойного рассеяния и не вяжется с данным в § 37 правильным определением. В § 33 стр. 95 допущена грубая ошибка в определении.

делении коэффициента самоиндукции обмотки статора (ротора). Приведенные здесь формулы

$$L_{1\text{полн}} = c_1 w_1^2 \sum_1^y \frac{k'_y}{y^2};$$

$$L_{2\text{полн}} = c_2 w_2^2 \sum_1^y \frac{k''_y}{y^2}$$

на самом деле определяют не полный коэффициент самоиндукции обмотки статора (ротора), а лишь часть индуктивности обмотки, обусловленную магнитным потоком, пронизывающим воздушный зазор машины.

На стр. 138 явно неправильно указано  $I_{0a} = \frac{Sp_0}{m_1 E_1}$  — активная составляющая тока холостого хода, определяющая э. д. с. рабочего потока.

Несколько ниже на стр. 139 приведены две схемы замещения (рис. 124) для холостого хода. Автор совершенно не отмечает существенного принципиального различия между обеими схемами. Верхний рисунок отвечает физически правильному представлению о локализации потерь в железе в „третичной“ обмотке. Второму рисунку отвечает представление о сдвиге фаз между потоком и намагничивающей силой.

На странице 139, объясняя, почему тихоходные двигатели имеют большую величину  $a$  (относительного тока холостого хода), автор говорит следующее: „Тихоходные двигатели имеют большую величину  $a = \frac{I_0}{I_1}$  вследствие большего диаметра и соответственно большего (по механическим соображениям) воздушного зазора“. Это объяснение неправильное, так как значение относительного тока холостого хода определяется, главным образом, отношением воздушного зазора к полюсному делению, а не абсолютным значением диаметра или зазора.

На стр. 143 автор говорит: „Поэтому можно считать, что рабочий поток  $\Phi$  создается при замкнутом роторе некоторым условным током холостого хода  $I_0$ , являющимся геометрической суммой токов  $I_0 = I_1 + I_2'$ . Активная составляющая этого тока покрывает потери в железе, а реактивная составляющая намагничивает первую гармонику потока“. В результате неясно, создается ли магнитный поток всем током или только его реактивной составляющей?

На стр. 144 при выводе формул приведенного сопротивления беличьей клетки автор говорит: „Итак, число витков в фазе ротора равно половине“. Следовало бы отметить, что речь идет о витке, сцепленном с половинным потоком, так как число витков может быть только целым в замкнутой цепи.

На стр. 165 при выводе формулы вращающего момента по Клоссу не следует полагать, как это делает автор,  $a = \frac{z_0 + z_1}{z_0} = 1$ . Достаточно положить  $r_1 = 0$ . Из приведенных там же формул видно, что  $a$  в окончательный результат явно не входит. В связи с этим находятся и выводы автора в главе 23 (стр. 245), посвященной разбегу асинхронного двигателя. Автор некритически относится к своим выводам, утверждая, что „во всяком случае данное решение будет точнее решения Рюденберга“.

Полагая  $r_1 = 0$ , автор фактически оперирует той же формулой Клосса, которой воспользовался и Рюденберг. Оба интегрируют одно и то же уравнение и получают одинаковые результаты, только облеченные в различную форму. Достаточно сопоставить обе формулы, чтобы убедиться в большей наглядности и удобстве формулы Рюденберга (Р. Рюденберг, „Явления неустановившегося режима“, русское изд. 1931 г.).

По Апарову

$$t = \frac{I_{\omega 1n}}{M_{\text{пуск}}} \left[ \frac{ar_2'^2}{ar_2'^2 + (x_1 + ax_2)^2} (-\ln s) + \frac{(x_1 + ax_2')^2}{ar_2'^2 + (x_1 + ax_2)^2} \cdot \frac{1 - s^2}{2} \right];$$

по Рюденбергу

$$t = T_k \left( \frac{c_m}{4s_m} + \frac{c_m}{2} \ln \frac{1}{s} \right).$$

Можно ограничиться приведенными примерами. Как же выполнены обещания автора в части детального освещения теории особых режимов работы асинхронных двигателей?

Например, работе двигателя при несимметричном напряжении на зажимах посвящена одна страница — меньше чем второстепенному вопросу о неисправностях замыкающего механизма. Ни одного числового результата, из которого видно влияние несимметрии, в книге нет. Дальше уравнений для импеданса прямой и обратной последовательности выводы автора не идут. Более подробно рассмотрен режим работы с неравными сопротивлениями в фазах ротора. Автор совершенно игнорирует имеющиеся по этому вопросу обстоятельные исследования (например инж. Г. И. Штурмана) и строит изложение на своих работах, содержащих ряд допущений и приводящих лишь к грубо приближенной теории.

Машины двойного питания приобретают большое значение в связи с применением так называемого «электрического вала» и различных схем синхронного вращения для передачи команды и силы. Эти вопросы совершенно не затронуты в главе 33, где приведены лишь частные случаи, рассмотренные И. А. Черданцевым, и не имеющие практического значения асинхронные режимы машин двойного питания. Можно сказать, что в книге дана новейшая теория асинхронной машины, если такой важный раздел, как нестационарные процессы (глава 29), изложен так, как это принято было лет 25 назад? Об операторном методе в сочетании с методом симметричных составляющих, получивших исключительно широкое применение в последнее время, в главе 29 и не упоминается. Выводы перегружены выкладками, связанными с определением постоянных интегрирования, и плохо истолкованы с точки зрения физики переходных процессов. Например, говоря о корнях характеристического уравнения (конец 289 стр.), автор заявляет: «Угловая скорость колебаний определяется мнимой частью корня». Действительный член изоборота, содержит возрастание по времени ( $a$  — отрицательно) или убывание ( $a$  — положительно). Свободные токи во всех разбираемых автором случаях могут только за-

тухать, т. е. вещественная часть корня может быть только отрицательной. В главе 31 вдруг появляются без всякого вывода формулы для короткого замыкания асинхронной машины. Фигурируют понятия реактивностей по продольной и по перечной оси. Ни в этой главе ни в предыдущих или последующих не говорится о теории двух реакций. Таким образом читатель, не знакомый с этой теорией, должен принять выводы на веру, кстати и литература к этой главе не указана. Уместно было бы изложить главу 33 в курсе синхронных машин или же предпослать основы теории двух реакций.

Следует еще отметить § 131 главы 29, посвященный вопросам перенапряжений в двигателях, приключенных к надземной линии.

Ведь разбираемая книга является учебником и поэтому здесь неуместны общие рассуждения, приведенные в § 131, где нет ни одного рисунка, схемы, цифры или формулы, касающихся разбираемых явлений. Что может дать читателю, не знакомому с предметом такого рода, такое указание, как: «если фронт волны приложенного колебания не особенно крут, то он может быть сглажен посредством приключения емкости между зажимами машины и землей» (подчеркнуто мной — И. Б.). Выражениями, подобными цитированному, изобилует § 131. Сведения, даваемые в учебнике, должны быть конкретными, или их совсем не следует приводить.

Нет возможности останавливаться на содержании всех глав, посвященных специальному вопросам. Приведенных примеров достаточно для выводов. Хорошее и, безусловно, нужное начинание, предпринятое проф. Б. П. Апаровским, в значительной мере обеспечивается. С другой стороны, нельзя не считаться с тем, что в первом издании почти неизбежны дефекты, тем более, что в целом рассматриваемая книга является оригинальной по содержанию и в значительной части базируется на работах самого автора. Остается желать, чтобы автор в следующем издании дал бы книгу, вполне отвечающую требованиям к современному учебному руководству.

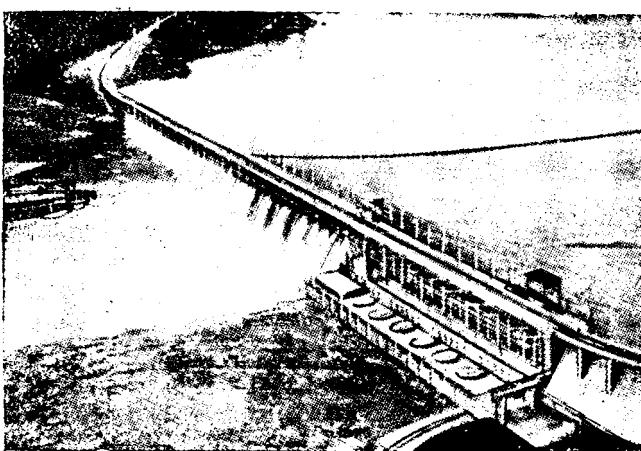
И. С. Брук

## РЕФЕРАТЫ

### Гидроэлектроцентрали открытого типа

Trans. of the Amer. Soc. of Mechanical Engineers Vol. 59, № 2 стр. 72, 1937

В то время как в Европе известны только две гидроэлектроцентрали открытого типа (Hengstey II в Германии и Vargön в Швеции), в США уже с 1912 г. сооружаются гэц, использующие открыто установленный кран, который позволяет свести верхнее строение гэц к размеру, необходимому только для помещения отдельных генерирую-



щих единиц. Этот тип гэц уже вышел из стадии экспериментирования и в настоящее время применен на 20 гидроэлектроцентралях, некоторые из которых расположены в относительно сухих зонах с климатическими условиями

На настоящий момент насчитывается 220 гидростанций — лет успешного функционирования гэц этого типа. Открыто установленный кран в США применен также для двух тепловых электростанций и во многих случаях для установок на электрических подстанциях синхронных конденсаторов.

### Гэц с открытоустановленным краном (США)

№ п/п	Наименование установки	Штат	Число единиц (агрегатов)	Мощность каждого агрегата кв	Год начала работы
1	Jackson Shoals	Алабама . . .	2	500	1912
2	Drop	Вашингтон . . .	1	1 400	1914
3	Olmsted	Юта . . . . .	1	5 500	1917
4	Cove	Айдахо . . . . .	1	7 500	1917
5	Thousands Springs	Айдахо . . . . .	1	6 000	1920
6	Mitchell Dam	Алабама . . . .	3	17 500	1923
7	Powerdale	Орегон . . . . .	1	6 000	1923
8	American Falls	Айдахо . . . . .	4	6 000	1924
9	Blanchard	Миннесота . . .	2	6 000	1924
10	Otsego	Мичиган . . . . .	2	850	1925
11	Lewiston	Айдахо . . . . .	2	5 000	1927
12	Norwood (Tillery)	Сев. Каролина . . . . .	2	22 000	1928
			1	18 000	1928
13	Merced Falls	Калифорния . . .	1	3 440	1930
14	Morony	Монтана . . . . .	2	22 500	1930
15	Ariel	Вашингтон . . . . .	1	45 000	1931
16	Carpenter	Арканзас . . . . .	2	28 000	1931
17	Dam № 7	Кентукки . . . . .	3	700	1929
18	Osage	Миссури . . . . .	6	21 500	1931
19	Twin Falls	Айдахо . . . . .	1	8 450	1935
20	Wheeler Dam	Алабама . . . . .	2	32 000	1937

Путем применения открытого типа машинного здания в большинстве случаев могут быть сокращены стоимость и время сооружения гэц, — повидимому, значительней всего при большом числе агрегатов.

Н. А. Караулов

HOLZER W. Об измерении высоких напряжений с помощью искровых промежутков. Е и М № 11, 1937, S. 127-135

Измерение высоких напряжений с помощью разряда в газах (пробоя) принадлежит к старейшим точным методам электроизмерительной техники.

Для получения однофазных результатов при искровом разряде необходимо обеспечить однородность поля. Это достигается установлением определенных искровых промежутков и исключением краевого эффекта путем применения электродов Максвелла-Роговского (края их закруглены так, чтобы они совпадали с эквипотенциальными линиями некоторого плоского поля). Пробивная крепость поля  $E_d$  не постоянна и подчиняется закону

$$E_d = 23,85\delta + \frac{7,85}{\sqrt{s}} \sqrt{\delta} \text{ кВ/см},$$

где  $\delta$  — плотность воздуха, а  $s$  — расстояние между электродами.

Шары для искровых разрядников изготавливаются из меди; легкие металлы можно использовать только в исключительных случаях. Точность обработки как по номинальному диаметру, так и по сферичности должна отклоняться от нормы не более чем на 1%. Вообще говоря, нужно создать набор шаровых электродов следующих диаметров:

$D$  (см) 5, 10, 15, 25, 50, 75, 100, 150 и 200.

Установки для высоких напряжений должны иметь также и более крупные шары ( $D = 240$  и 300 см). Особое внимание нужно обращать на кривизну и полировку противолежащих шаровых сегментов. Толщина стержня, на котором укрепляется шар, должна находиться в пределах 10—20% от диаметра электрода. Его длина должна быть не меньше 2,5 диаметра и определяется его механической прочностью.

Малые электроды монтируются по горизонтали, а большие — по вертикали. В обоих случаях все заземленные и токо-проводящие объекты должны быть удалены от установки на расстояние по крайней мере пяти диаметров шаров, причем при больших диаметрах эти требования повышаются (например, при  $D = 100$  см свободное пространство вокруг шара должно составлять не менее 11 т в поперечнике).

Изменение искрового промежутка осуществляется на расстоянии и требует весьма точно работающих устройств, переключающихся по меньшей мере на две скорости: на 50—20 мк/сек и на  $\leq 2$  мк/сек. Наиболее точный отсчет искрового промежутка достигается применением микрометрических нарезок и набора эталонных плиток.

Пробное напряжение также надлежит тонко регулировать и повышать ступенями не больше чем по 0,5%. В установках следует избегать трансформаторов и дросселей с переменным числом витков. Соединения между источником напряжения и разрядником следует осуществлять только через сопротивления из приблизительного расчета 0,25—1 $\Omega$  на 1 В измеряемого напряжения. При этом нужно избегать волнистых сопротивлений, пользуясь проволочным или из сеток; последние целесообразно сворачивать в пакеты, закрытые во избежание радиации. При работе на высоких частотах и с ударными напряжениями, наоборот, следует избегать всяких сопротивлений и закорачивать провода между разрядником и исследуемым объектом.

Чтобы устраниТЬ возможность замедления разряда при измерениях напряжений ниже 59 кВ, искровые промежутки облучают, вводя тем самым дополнительную ионизацию. При малых напряжениях для этой цели пользуются кварцевой лампой, а при работе с ударными напряжениями весьма оправдали себя препараты радия.

Автор приводит таблицы градуировок пробивных напряжений для шаров диаметром 5—100 см и промежутков 0,5—80 см (симметричная нагрузка) и для диаметров 5—200 см и промежутков 2—400 см [один полюс источника тока заземлен (при 2 $\frac{1}{2}$  и 760 mm Hg) частота техническая], заимствованные им из различных источников. При ударных напряжениях нужно учитывать зависимость разряда от полярности, а чтобы от этой зависимости избавиться, надлежит пользоваться как можно меньше искровым промежут-

ком порядка  $1,6 \sqrt{\frac{D}{2}}$ , где  $D$  — диаметр шара.

Для экстраполяции значений пробивных напряжений наиболее точна экспериментально выведенная формула Пика:

$$U_{\max} = E_0 \frac{s}{f} = \left( A + \frac{B}{\sqrt{\delta D}} \right) \cdot \delta D \left( \frac{s}{D} \cdot \frac{1}{f} \right).$$

Здесь  $U_{\max}$  — пробивное напряжение в кВ;  $E_0$  — напряженность поля в кВ/см;  $s$  — расстояние между электродами в см;  $f$  — коэффициент, выводимый из теории потенциала;  $A = 27,747$ ;  $B = 21,004$ ;  $D$  — диаметр шара в см;  $\delta$  — плотность воздуха.

Им же составлена таблица значений  $f$  в зависимости от  $D$ . Формулу Пика можно сокращенно выразить так:

$$U = a \left( \frac{s}{D} \cdot \frac{1}{f} \right);$$

здесь в случае симметричной нагрузки шаров вводятся  $f = f_1$ , а в случае заземления одного полюса  $f = f_2$ .

Плотность воздуха определяется по формуле:

$$\delta = \frac{b \cdot 293}{760 (273 + t)} = 0,386 \frac{b}{273 + t},$$

где  $b$  — атмосферное давление в mm Hg, а  $t$  — температура в  $^{\circ}\text{C}$ .

Во второй половине статьи автор приводит методику измерений при технических и высоких частотах и при ударном напряжении; пользуясь конкретными примерами, он дает ряд практических указаний как по технике измерений, так и по мерам обеспечения безопасности и точности опыта. Он обращает особое внимание на чистоту и тщательную полировку шаров, а также на влажность воздуха в помещении, которая заставляет вносить поправки в результаты (10%-ное повышение влажности повышает разряженное напряжение на 0—1% при малых опорных изоляторах и на 2—4% при больших изоляторах). Хотя автор и предлагает во избежание этих поправок производить измерения при 40—60% относительной влажности, но вместе с тем он отмечает, что этот вопрос требует дальнейшего исследования.

Прореферированная обзорная статья содержит ряд ценных практических указаний и цифровых данных, интересных для экспериментаторов в области искровых разрядов; она заслуживает внимательного изучения, для чего может быть следовало бы опубликовать ее перевод в нашей технической периодике.

Г. Б. Степлих

I. A. WEH. Измерение теплопроводности электроизолирующих материалов. GER, Vol. 40, № 3, p. 138, 1937.

В реферируемой статье подробно описывается разработанная в лаборатории General Electric Company весьма удобная в практических условиях методика измерения теплопроводности электроизолирующих материалов. Эта методика основана на хорошо известном принципе измерения температур на противоположных поверхностях, имеющего вид пластинки образца испытуемого материала. При этом образец зажимается между нагревателем (сопротивление, обогреваемое электрическим током) и холодильником, обтекаемым холодной проточной водой.

Приводим полученные автором значения теплопроводности различных электроизолирующих материалов (в  $\text{W}/\text{см}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , при средней температуре материала в 40—50°).

Текстолит . . . . .	0,0033
Микалекс . . . . .	0,0057
Лакоткань . . . . .	0,0019 —0,0023
Резина . . . . .	0,00151
Ацетил-целлюлоза . . . . .	0,00185
Битуминозный компаунд . . . . .	0,00155
Битуминозный компаунд + 75% песка . . . . .	0,0077
Сухой песок . . . . .	0,0035
Песок с трансформаторным маслом . . . . .	0,0094
Бетон (40% цемента, 60% песка) . . . . .	0,0100

Б. М. Тареев

Действие электрического тока на сердце ETZ № 7, февраль, 1937, стр. 181—182

Изучение причины смерти, вызываемой электрическим током, является предметом исследований, производимых в последние годы у нас в СССР, в Германии, США и в других странах. В Германии оно производится главным образом над собаками, а в Америке над овцами; над мелкими животными оно делалось только для сравнения.

При всех этих исследованиях, распространявшихся более чем на 150 животных и для которых многие годы, целью служит установление той силы тока, при которой при всяком направлении тока по телу, при всякой частоте тока и при всякой длительности действия тока не получается никакого расстройства сердца.

При повышении силы тока до некоторого предела всегда имеется момент, когда под влиянием тока мускулы пруди перестают работать, вследствие чего прекращается дыхание. При длительном действии тока животное задыхается и умирает, но действие это должно продолжаться не секунды, а минуты. Когда же сила тока выше предела, получается смерть даже и в том случае, когда ток действовал только несколько секунд, т. е. много меньше того времени, которое нужно для остановки дыхания. В этом последнем случае получается расстройство деятельности сердца, причем мускулы его и предсердия начинают растягиваться и сжиматься неравномерно. От этого приостанавливается кровообращение и наступает истощение важных для жизни органов сердца и мозга вследствие недостатка крови и наступает смерть. При этих исследованиях, делавшихся при заранее установленных условиях (сила тока, продолжительность действия его и наперед установленная фаза сердцебиения), деятельность сердца иллюстрировалась кривыми электрокардиографа, а сила и напряжение тока определялись посредством осциллографа.

Из полученных при них данных заслуживают общего внимания результаты действия тока длительностью от 1 до 0,03 sec. Оказывается, что ток, действующий на сердце в период его сжатия, никакого влияния не оказывает, как бы он велик ни был, и что вредное действие его на сердце оказывается только в период расширения и покоя сердца. При продолжительности действия тока, равной 0,03 sec, при продолжительности периода сердцебиения в 0,45 sec, ток вызывает расстройство сердца только в тот период работы сердца, когда уменьшается напряжение его мускулов. При продолжительности действия тока большей, чем указанный период сердцебиения, т. е. от 0,10 до 0,12 sec, требуется, чтобы сила тока была не меньше той, какая требуется при действии в течение 0,03 sec. Для 24 овец из числа 32 испытанных в этом случае сила тока оказалась равной той, какая требовалась при 0,03 sec, а для 8 из них примерно в 3 раза выше. Напротив, при действии тока в период, равный периоду одного сердцебиения, или больший, достаточно тока силой в 0,1 той, при которой получается расстройство сердца при действии в течение 0,03 sec.

Расстройство сердца является единственной серьезной угрозой жизни; временные же остановки и сердцебиение к смерти не ведут. Опыты с большим током, а именно: от 23 до 26 A, при подводе тока с обеих сторон пруди показали, что повторные удары в этих случаях не вызывают расстройства сердца даже в том случае, когда они проводятся во время критического периода его деятельности.

Оживить расстроенное током сердце посредством действия током силой от 4 до 7 A (напряжение — 3000 V, направление: передняя нога — задняя нога) не удавалось. Это удалось в 14 случаях из 32 (44%) при пользовании током силой от 25 до 30 A и особых электродах, из которых один помещается на груди спереди, а другой —

на плечах, а равнно и при подводе тока с обеих сторон пруди при силе тока от 22 до 27 A — в 77 случаях из 120 (61%).

В первом случае между моментом расстройства сердца и моментом приведения в действие с целью оживления тока большей силы проходило от 1 min 10 sec до 4 min, а во втором от 55 sec до 20 min 30 sec.

Многие из оживленных при указанных опытах животных, подвергавшиеся после оживления особым наблюдениям в течение нескольких месяцев, никаких расстройств здоровья не показали. Противоудар для оживления должен применяться тотчас же после несчастья, а именно: уже через несколько секунд, а не через несколько минут.

Методами восстановления дыхания во всяком случае пренебрегать не следует, чтобы до известной степени поддержать циркуляцию крови, в особенности в сосудах сердца и мозга.

И. И. Тихонов

Исследование электродов с целью получения устойчивых против коррозии сварных соединений. ETZ, N. 4 28 января 1937

Химическая устойчивость сваренных швов зависит не только от рода и свойств самих свариваемых изделий, но также и от свойств электродов. Чтобы выяснить этот вопрос, I. Beillie, A. Letou и A. Roux произвели с этой целью большое количество сварок обыкновенной углеродистой стали, а также медистой стали и, кроме того, стали содержащей медь и хром, и никелевой стали, причем употребляли электроды следующего различного состава (см. таблицу).

Углерод %	Кремний %	Марганец %	Хром %	Медь %	Никель %
0,11	0,01	0,01	—	—	—
0,05	0,19	0,75	—	—	—
0,19	0,04	0,20	0,19	0,58	—
0,02	0,02	0,23	—	—	1,60

Электроды были диаметром 4 mm с обмазкой от 0,5 до 0,7 mm. Работа велась с током силой от 110 до 140 A, причем изучалось влияние электродов на отношение шва к разъедающему действию серной кислоты и морской воды.

При этом было установлено, что независимо от свойств электродов наиболее благоприятные результаты при сварке по отношению к химическим реагентам получаются тогда, когда шов вполне здоров и свободен от всяких пузырей, окислов и шлака.

Поведение сваренных соединений в отношении кислоты и морской воды не совсем одинаково, а именно: электроды, содержащие хром и медь, повышают химическую устойчивость сваренного места по сравнению с нелегированными электродами — в случае разъединения кислотой; в случае же действия морской водой более всего улучшают свойства шва электроды с примесью никеля.

Необходимо при сварке различных сортов стал употреблять разные электроды и можно пользоваться одним и тем же сортом электродов как при сварке очень мягкой стали, так и при сварке хромистой и медистой стали, которая, имея хорошие механические свойства, соединяет их с высоким сопротивлением коррозии.

И. И. Тихонов

ИЗДАТЕЛЬ ОНТИ

Технический редактор А. П. Александрова

Отв. редактор А. А. Климоцкий

Зав. ред. М. Г. Башкова

Сдано в набор 28/V 1937 г. Подл. к печати 20/VI 1937 г. Стат. ф. 226×293. Печ. л. 7. Ул. л. 9,1. Печатн. зн. в листе 78 800.

Уполн. Главл. Б—23128. 1-я Журналная тип. ОНТИ НКТП СССР. Москва, Денис

# КНИГОСБЫТ ОНТИ

**ВЫШЛА ИЗ ПЕЧАТИ НОВАЯ КНИГА И ПОСТУПАЕТ В ПРОДАЖУ**

**Линкер Артур, проф.** Электрические измерения. Перевод с 4-го нем. изд. Под ред. проф. А. С. Касаткина. Гл. ред. энергетич. лит-ры. 1937. Стр. 624. Ц. 10 р. 50 к., пер. 2 р.

Обширный труд энциклопедического характера, охватывающий все основные вопросы измерений электрических величин.

В каждом разделе излагаются общие принципы данного измерения и дается ряд кратких указаний на различные работы в рассматриваемом направлении.

## **ИМЕЮТСЯ В ПРОДАЖЕ**

**Даннат Дальглейм.** Передача электрической энергии объединенными сетями. Перевод с англ. инж. А. А. Вишневского. Гл. ред. энергетич. лит-ры. 1935. Стр. 366. Ц. в пер. 5 р. 50 к.

**Даль О.** Электрические цепи. Т. 1. Расчет токов короткого замыкания и теория установившегося режима. Перевод с англ. инж. Н. П. Краснушкина и П. И. Сазанова. Энергоиздат. 1933. Стр. 406. Ц. в пер. 6 р.

**Гульденбальк В.** Сооружение линии электропередач высокого напряжения. Энергоиздат. 1934. Стр. 260. Ц. 4 р. 25 к.

**Глазунов А., проф., Рябков А.** Расчет электрических сетей энергетических систем. Допущено ГУУЗом НКТП в качестве учебного пособия для энергетических вузов. Гл. ред. энергет. лит-ры. 1935. Стр. 186. Ц. 2 р. 40 к.

**Продажа в магазинах и киосках Книгосбыта ОНТИ и КОГИЗа**

Желающие могут получить книгу по почте:

Москва, Рыбный пер., д. 2, пом. 26 «Техкнига—почтой»

Ленинград, В. О., 4-я линия, д. 13 «Техкнига—почтой»

Киев, ул. Свердлова, д. № 2 «Техкнига—почтой».

Харьков, Спуск Халтурина, д. № 5 «Техкнига—почтой».

**КНИГИ ВЫСЫЛАЮТСЯ НАЛОЖЕННЫМ ПЛАТЕЖОМ БЕЗ ЗАДАТКА.**

Вологодская областная универсальная научная библиотека

[www.booksite.ru](http://www.booksite.ru)